

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ENERGETIKY

Kompaktní fúzní reaktor

Compact fusion reactor

Autor:

Jan Opletal

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Opletal**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí
Téma: **Kompaktní fúzní reaktor**
Compact Fusion Reactor
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte studii o vývoji energetických fúzních reaktorů. Zaměřte se na koncepční řešení fúzních reaktorů různých typů zejména na přestup tepla pomocí sodíkových chladicích okruhů, konstrukci a řešení teplosměnné plochy, technologii sodíku při sdílení tepla v tekutých kovech řešené pomocí teorie modelování. Popište termonukleární reakci s využitím lithia a navrhnete zjednodušené tepelné schéma fúzního reaktoru o výkonu do 100 MW s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla.

Seznam doporučené odborné literatury:

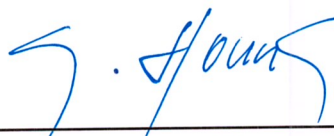
Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1. a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
Mátal, O.: *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
Hezoučský, F.: *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě dne 18.5.2020


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“ má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3. Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.5.2020


.....
podpis autora práce

Anotace bakalářské práce

OPLETAL, J. Kompaktní fúzní reaktor: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2020, 69 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Bakalářská práce se zabývá souhrnem informací o koncepci kompaktních termonukleárních reaktorů s využitím chladicího média sodíku. V úvodu práce je popsán princip termonukleární fúze a fúzní reakce. Následuje popis kompaktních fúzních reaktorů s definicí plazmatu. Práce pokračuje popisem fyzikálních a chemických vlastností sodíku, jeho čištění a používaná zařízení v tepelných systémech chlazených sodíkem. V předposlední kapitole je popsána teorie sdílení tepla, včetně podobnostních kritérií. V samotném závěru je nastíněna predikce přestupu tepla tekutých kovů v potrubích kruhového průřezu, mezikružích a podélném obtékání trojúhelníkové mříže používané v tepelných výměnících.

Klíčová slova: termonukleární fúze, plazma, reaktor, sodík

Annotation of bachelor thesis

OPLETAL, J. Compact fusion reactor: Bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2020, 69 p. Thesis head: Kolat, P.

The thesis deals with conceptual solution of compact fusion reactors with liquid sodium used as a coolant. The introduction describes the principle of thermonuclear fusion and its reactions. Methods of magnetic and inertial confinement are also included. The work continues with a description of the physical and chemical properties of liquid sodium coolant, its purification and equipment used in sodium cooled systems. The last chapter describes the theory of heat transfer, including criteria of similarity. In the very end, the prediction of heat transfer of liquid metals are made.

Keywords: thermonuclear fusion, plasma, reactor, sodium

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých značek a symbolů | 9 |
| Úvod | 13 |
| 1 Princip termonukleární fúze | 15 |
| 1.1 Fyzika jaderné fúze | 15 |
| 1.2 Coulombův zákon | 16 |
| 1.2.1 Coulombova potenciálová bariéra | 16 |
| 1.3 Kritická zápalná teplota | 17 |
| 1.4 Lawsonovo kritérium | 18 |
| 1.4.1 Faktor zisku energie Q | 19 |
| 1.5 Magnetické udržení | 19 |
| 1.5.1 Princip tokamaku | 19 |
| 1.5.2 Princip stelarátoru | 20 |
| 1.6 Inerciální udržení | 21 |
| 1.7 Fúzní reakce | 22 |
| 1.8 Bezpečnost | 23 |
| 1.8.1 Sekundární radioaktivita | 23 |
| 2 Koncepce kompaktních fúzních reaktorů | 24 |
| 2.1 Lockheed Martin CFR | 24 |
| 2.2 Tokamak Energy ST40 | 25 |
| 2.2.1 Vnitřní a vnější vakuová komora | 26 |
| 2.2.2 Magnetické pole | 26 |
| 2.3 Paprskový fúzní reaktor pro vesmírný pohon CBFR-SPS | 27 |
| 2.3.1 Parametry CBFR pro výkon 100 MW | 29 |
| 3 Plazma | 31 |
| 3.1 Kvazineutralita plazmatu | 31 |
| 3.2 Kolektivní chování plazmatu | 31 |
| 3.3 Debyeovo stínění | 32 |
| 3.4 Langmuirova frekvence | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Vlastnosti sodíku | 34 |
| 4.1 | Fyzikální vlastnosti | 34 |
| 4.1.1 | Hustota | 34 |
| 4.1.2 | Dynamická a kinematická viskozita | 35 |
| 4.1.3 | Tepelná kapacita | 35 |
| 4.1.4 | Součinitel tepelné a teplotní vodivosti | 36 |
| 4.2 | Chemické vlastnosti | 37 |
| 4.3 | Průmyslová výroba sodíku | 37 |
| 5 | Sodík v tepelných systémech | 38 |
| 5.1 | Srovnání sodíku s ostatními tekutými kovy | 38 |
| 5.2 | Příměsi v tekutém sodíku | 39 |
| 5.2.1 | Příměsi obsahující uhlík | 40 |
| 5.2.2 | Oxidy sodíku a hydroxid sodný | 42 |
| 5.3 | Čištění tekutého sodíku | 43 |
| 5.3.1 | Filtrace | 43 |
| 5.3.2 | Chladné jímky | 43 |
| 5.4 | Údržba tepelných systémů s tekutým sodíkem | 45 |
| 6 | Zařízení v sodíkových tepelných systémech | 47 |
| 6.1 | Tepelné výměníky | 47 |
| 6.2 | Parogenerátory | 48 |
| 6.3 | Oběhová čerpadla | 49 |
| 6.3.1 | Elektromagnetická čerpadla | 50 |
| 6.3.2 | Mechanická čerpadla | 50 |
| 6.4 | Průtokoměry | 51 |
| 7 | Sdílení tepla v tekutých kovech | 52 |
| 7.1 | Teorie sdílení tepla | 52 |
| 7.1.1 | Sdílení tepla kondukcí | 52 |
| 7.1.2 | Sdílení tepla konvekcí | 52 |
| 7.1.3 | Sdílení tepla radiací | 53 |
| 7.2 | Kritéria podobnosti | 54 |
| 7.2.1 | Pécletovo kritérium | 54 |

| | | |
|----------------------------------|---|-----------|
| 7.2.2 | Reynoldsovo kritérium | 54 |
| 7.2.3 | Nusseltovo kritérium | 54 |
| 7.2.4 | Prandtlovo kritérium | 55 |
| 7.2.5 | Grashoffovo kritérium | 55 |
| 7.3 | Přirozená konvekce | 56 |
| 7.4 | Nucená konvekce | 56 |
| 7.4.1 | Predikce přestupu tepla v kruhovém potrubí | 57 |
| 7.4.2 | Predikce přestupu tepla v mezikruhovém kanálu | 58 |
| 7.4.3 | Podélné obtékání svazků trubek v trojúhelníkové mříži | 59 |
| Závěr | | 60 |
| Seznam použité literatury | | 62 |
| Seznam obrázků | | 66 |
| Seznam tabulek | | 67 |
| Seznam příloh | | 68 |

Seznam použitých značek a symbolů

Seznam symbolů

| | | |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| E | energie | [J] |
| Δm | úbytek hmotnosti | [kg] |
| c | rychlost světla ve vakuu | [m·s ⁻¹] |
| F_c | coulombova síla | [N] |
| k | Coulombova konstanta | [N·m ² ·C ⁻²] |
| q_i | elektrický náboj | [C] |
| r | vzdálenost dvou nábojů | [m] |
| U | elektrická potenciální energie | [J] |
| e | elektrický náboj | [C] |
| Z_i | atomové číslo prvku | [-] |
| ε_0 | permitivita ve vakuu | [F·m ⁻¹] |
| σ | účinný průřez | [m ²] |
| R | četnost reakcí | [s ⁻¹] |
| N | počet jader terčíku | [-] |
| Γ | tok odstřelujících částic | [m ⁻² ·s ⁻¹] |
| T | termodynamická teplota | [K] |
| n | hustota plazmy | [cm ⁻³] |
| τ_E | doba udržení výboje | [s] |
| Q | faktor zisku energie | [-] |

| | | |
|----------------|-----------------------------------|--|
| P_{out} | výstupní výkon | [W] |
| P_{in} | vstupní výkon | [W] |
| P_+ | stupeň ionizace plazmy | [-] |
| U_i | ionizační potenciál plynu | [J] |
| k | Boltzmannova konstanta | [J·K ⁻¹] |
| ρ_Q | prostorová hustota náboje | [J] |
| λ_D | Debyeova stínící délka | [m] |
| e | elementární náboj elektronu | [C] |
| ω_p | plazmová frekvence | [Hz] |
| m_e | hmotnost elektronů | [kg] |
| ρ_{Na} | hustota sodíku | [kg·m ⁻³] |
| μ_{Na} | dynamická viskozita sodíku | [Pa·s] |
| ν_{Na} | kinematická viskozita sodíku | [m ² ·s ⁻¹] |
| c_{pNa} | tepelná kapacita za stálého tlaku | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| λ_{Na} | tepelná vodivost | [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| a | součinitel teplotní vodivosti | [m ² ·s ⁻¹] |
| C_s | rozpustnost | [ppm] |
| q | hustota tepelného toku | [W·m ⁻²] |
| I | intenzita záření | [W·m ⁻²] |
| σ | Stefan-Boltzmannova konstanta | [W·m ⁻² ·K ⁻⁴] |
| ε | emisivita | [-] |

| | | |
|---------|--|------------------------------------|
| Gr | Grashoffovo číslo | [-] |
| Nu | Nusseltovo číslo | [-] |
| Pe | Pecletovo číslo | [-] |
| Pr | Prandltovo číslo | [-] |
| Re | Reynoldsovo číslo | [-] |
| L | charakteristická délka | [m] |
| v | rychlost proudění | [m·s ⁻¹] |
| β | teplotní součinitel objemové roztažnosti kapalin | [K ⁻¹] |
| g | gravitační zrychlení | [m ² ·s ⁻¹] |

Seznam zkratek

| | |
|---------------------------------|---|
| H | vodík (¹ H) |
| D | deuterium (² H těžký vodík) |
| T | tritium (³ H velmi těžký vodík) |
| Li | lithium |
| He | helium |
| B | bor |
| Na | sodík |
| NaOH | hydroxid sodný |
| Cl | chlor |
| Na ₂ CO ₃ | uhličitan sodný |

| | |
|--------------------------------|---|
| NaCN | kyanid sodný |
| Fe ₃ C | karbid železa |
| Na ₂ O | oxid sodný |
| Na ₂ O ₂ | peroxid sodný |
| AC | Alternating Current |
| DC | Direct Current |
| CBFR-SPS | Colliding Beam Fusion Reactor Space Propulsion System |
| CFR | Compact Fusion Reactor |
| EAEC | European Atomic Energy Community |
| FRC | Field-Reversed Configuration |
| HTS | High-temperature superconductors |
| ITER | International Thermonuclear Experimental Reactor |
| ST | spherical tokamak |
| tokamak | toroidálna kamera i magnitnyje katuški |
| TNT | trinitrotoluen |
| MHD | magnetohydrodynamická konvekce |
| TGC | termogravitační konvekce |

Úvod

Tématem jaderné energetiky se zabývám, jelikož mi není lhostejná zhoršující se situace ve světě. Současné jaderné elektrárny, které využívají štěpnou reakci převážně uranu jsou sice z mého pohledu mnohem lepší volbou oproti uhelným elektrárnám a větrným farmám, ovšem vzniká vysoce radioaktivní odpad, který chladne tisíce let. Bezpečnost jaderných elektráren je na velmi vysoké úrovni, ale stále hrozí nebezpečí výbuchu reaktoru nebo úniku radioaktivních látek do ovzduší, i když minimální. Alternativním řešením by mohla být termojaderná fúze, kde se atomy neštěpí, ale slučují, tak jako v našem Slunci. Termojaderná fúze má nesčetné výhody. Odpadem štěpné reakce je helium, paliva je na Zemi téměř nevyčerpatelné množství, v reaktoru jsou v určitý moment jen jednotky gramů paliva, pokud nastane sebemenší technický problém fúzní reakce se sama zastaví atd. Ovšem „zkrotit“ tuto energii Slunce je technicky náročný úkol. Výzkum a stavba termojaderných reaktorů je také finančně velmi náročná, např. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), na kterém se podílí největší světové velmoci včetně EAEC (kam spadá i Česká Republika), má stát astronomických 500 miliard korun.

To je jeden z důvodů proč je snaha navrhnout menší a dostupnější reaktor, který by neměl tak velký výkon, ale i tak by dokázal zásobit město se sto tisíci obyvateli elektrickou a tepelnou energií. Díky kompaktním reaktorům by se také mohla zlevnit technologie odsolování mořské vody a zajistit tedy pitnou vodu v oblastech, kde je jí hrubý nedostatek. Kompaktní fúzní reaktory by také mohly nahradit konvenční pohonné systémy vesmírných plavidel a zkrátit tak cestu na Mars o polovinu, na větší vzdálenosti i více.

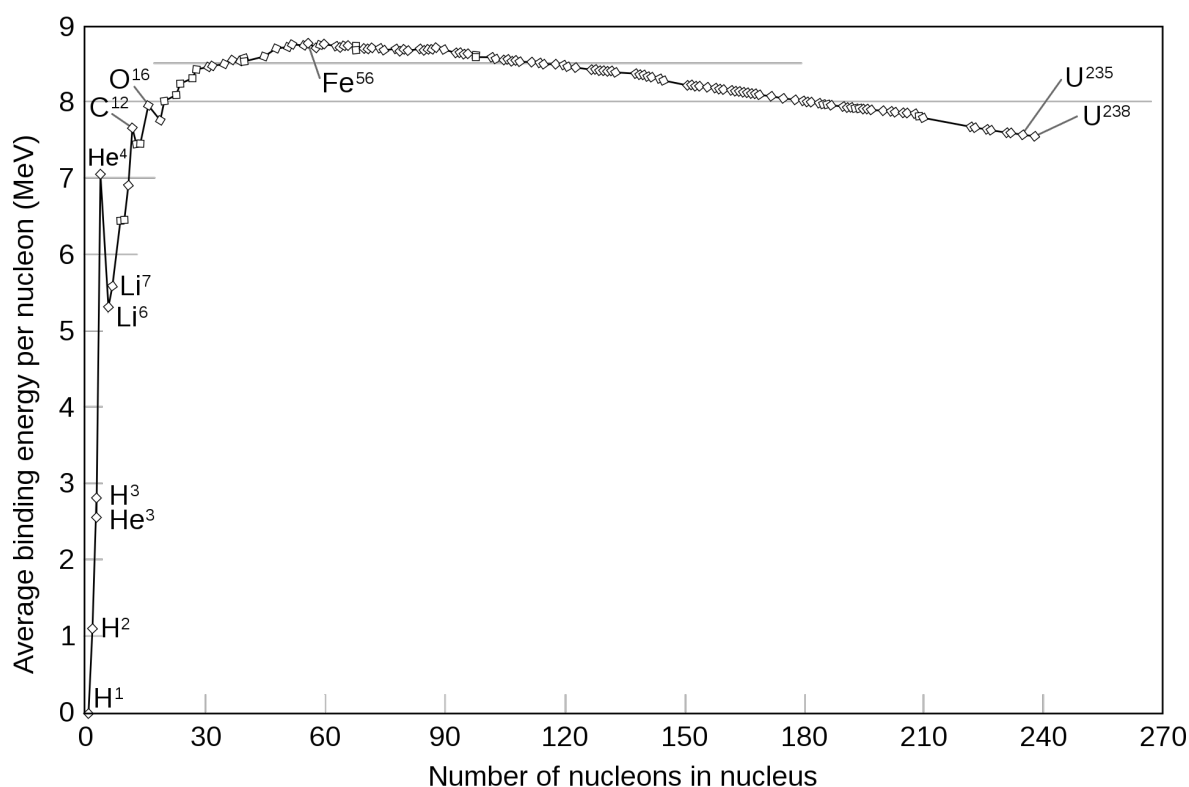
V mé práci se čtenáři nejdříve seznámí s fyzikou termojaderné fúze a slibnými typy reaktorů k udržení fúzní reakce po dostatečně dlouhou dobu. Dále se čtenáři dozví o koncepci kompaktních reaktorů a prototypů, které by mohly být komerčně využitelné do 10-15 let. Následuje popis plazmy, kde si popíšeme, jak je plazma definováno a jak vzniká. V další kapitole se seznámíme s technologií sodíku, proč je sodík vhodný jako chladicí médium pro rychlé jaderné a fúzní reaktory. Jeho fyzikální a chemické vlastnosti, ale také problémy se znečištěním sodíku kyslíkem a dalšími prvky, které

značně zhoršují vlastnosti sodíku. Následuje popis různých zařízení používaných v tepelných sodíkových systémech. Na závěr je probrána problematika sdílení tepla v tekutých kovech, nejdříve je však třeba si vysvětlit základní teorie sdílení tepla, jejich rozdělení a kritéria podobnosti, podle kterých se určuje přestup tepla v tekutých kovech.

1 Princip termonukleární fúze

1.1 Fyzika jaderné fúze

Energetické využití jaderné fúze je založeno na využití vazebné energie atomových jader, podobně jako v případě jaderného štěpení v současných jaderných elektrárnách. Při slučování atomových jader lehčích než železo na těžší jádra, dochází k uvolnění potenciálu jaderné vazebné energie. Součet hmotností produktů reakce je menší než součet hmotností sloučených jader. [1]

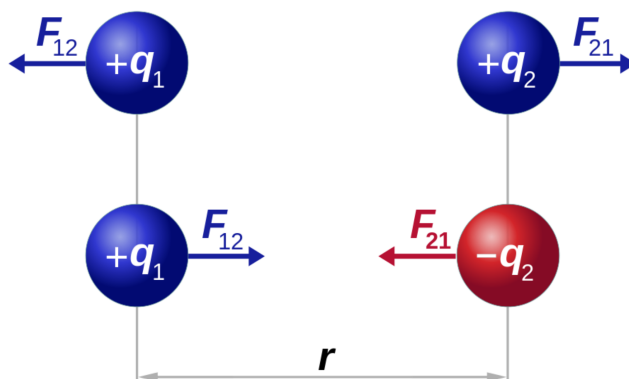


Obrázek 1: Vazebná energie jader [2]

Rozdíl hmotností je uvolněn ve formě energie v souladu se vztahem A. Einsteina $E = \Delta m \cdot c^2$ je úbytek hmoty Δm ekvivalentní energii E , v tomto případě energii záření a pohybu produktů reakce (c je rychlost světla ve vakuu). Záření a kinetické energie je právě onou uvolněnou jadernou energií. [1]

1.2 Coulombův zákon

Coulombův zákon popisuje sílu, kterou na sebe působí dva náboje q_1 a q_2 ležící ve vzdálenosti r . Důležité je zmínit, že pokud mají oba náboje stejné znaménko, je tato síla odpuzivá. Coloumbova síla se vypočítá ze vztahu $F_c = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, kde k je coloumbova konstanta.

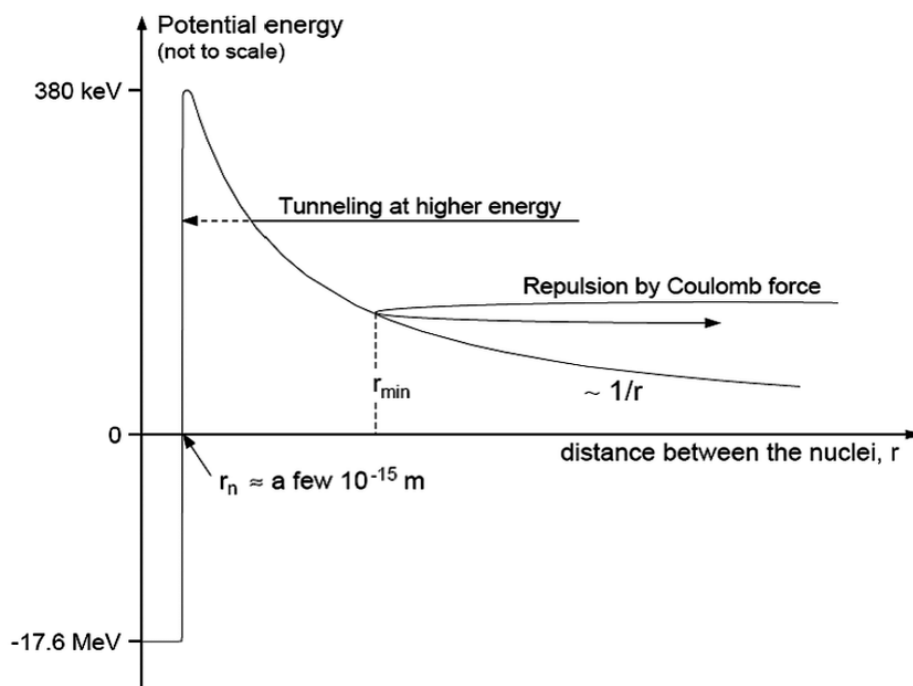


Obrázek 2: Coulombův zákon [3]

1.2.1 Coulombova potenciálová bariéra

Atomová jádra jsou kladně nabitá, a navzájem se odpuzují. Aby proběhla fúzní reakce, musí mít jádra dostatečnou energii k překonání této elektrostatické tzv. coulombovské bariéry. K tomu potřebujeme extrémní teploty. V případě hvězd, je tato bariéra díky obrovským tlakům a objemu paliva penetrována tzv. kvantovým tunelováním, umožňující fúzní reakci za menších teplot než je možné tady na Zemi. Vzhledem k tomu, že coulombova bariéra je elektrická potenciální energie dvou bodových nábojů (např. protonů), je energie k dosažení separace dána $U = \frac{ke^2}{r}$, kde e je elektrický náboj. Vzhledem k poloměru r , ve kterém dominuje jaderná přitažlivá síla, lze vypočítat teplotu nezbytnou ke zvýšení průměrné tepelné energie do tohoto bodu. Výška coulombovy bariéry může být vypočtena, pokud je známa jaderná separace a náboje částic. Jaderné poloměry mohou být vypočteny z hmotnostního a atomového čísla prvků: [4]

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_b}{R_a + R_b} \quad (1.1)$$



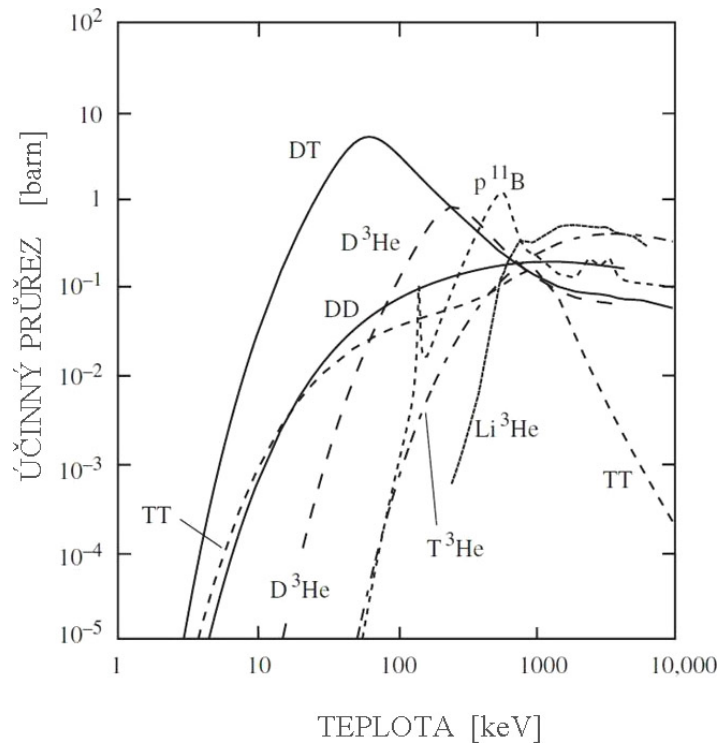
Obrázek 3: Coulombova potenciálová bariéra [4]

1.3 Kritická zápalná teplota

Za dosažitelných tlaků je potřebná extrémně vysoká teplota k překonání coulombové bariéry (obr. 3). Zápalná teplota je bod, při kterém se jaderná fúze stává udržitelná. K tomu dochází, když energie uvolňovaná fúzními reakcemi zahřívá palivovou hmotu rychleji, než ji různé ztráty dokáží ochladit. Předpokládaná výška coulombové bariéry je založena na vzdálenosti, ve které by jaderná síla mohla překonat coulombovo odpuzování. Požadovaná teplota může být nadhodnocena, pokud jsou pro tuto vzdálenost použity klasické poloměry jader, protože rozsah silné interakce je výrazně větší než klasický poloměr protonu. Ke zjištění pravděpodobnosti uvolnění fúzní energie se využívá tzv. účinný průřez neboli *cross-section*. Tato pravděpodobnost je větší pro částice s vyšší energií, ale kvůli Maxwellově distribuci je jich méně. Účinný průřez σ vypočítáme následovně: [4]

$$\sigma = \frac{R}{N\Gamma} \quad (1.2)$$

Kde R je česnost reakcí, N je počet jader terčíku a Γ je tok odstřelujících částic.



Obrázek 4: Účinný průřez fúzních reakcí [5]

1.4 Lawsonovo kritérium

Pro energetické využití termonukleární fúze musíme dosáhnout energetického zisku, tzn. že termonukleární reakce vyprodukuje více energie, než je potřeba k vytvoření a ohřátí plazmatu a k náhradě ztrát zářením a únikem částic z plazmy. Abychom dosáhli energetického zisku, musí být splněna tzv. Lawsonova kritéria na teplotu plazmy, její hustotu a dobu trvání výboje.

Ve své zprávě Lawson píše, že v pozemském reaktoru patrně nebude možné udržet neutrony, ale pouze nabitě částice vhodným magnetickým a elektrickým polem. Pro užitečný reaktor musí teplota T překročit hodnotu 10^8 K a součin hustoty plazmatu a času udržení výboje $n\tau$ zhruba 10^{16} s.cm⁻³. [6]

Z Lawsonova kritéria tak vyplývají dvě základní metody jak dosáhnout kladného zisku termonukleární reakce:

- s magnetickým udržením: nízká hustota plazmatu n , dlouhá doba udržení τ_E
- s inerciálním udržením: vysoká hustota plazmatu n , krátká doba udržení τ_E

1.4.1 Faktor zisku energie Q

Čistý výstupní výkon pro jadernou fúzi může být měřen z hlediska faktoru zisku energie Q , který je definovaný jako poměr výstupního výkonu fúzní energie a vstupního výkonu, tj. pomocný výkon, který musíme dodat.

$$Q = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.3)$$

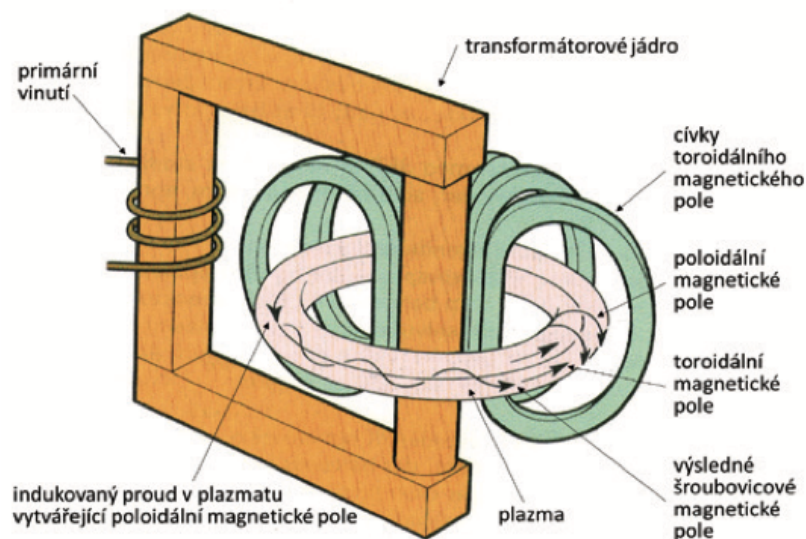
kde P_{out} je výstupní výkon a P_{in} vstupní výkon. Aby byl reaktor energeticky užitečný musí splňovat $Q > 1$. Stav, kdy $Q = 1$ označujeme jako „*break-even*“ (dochází k rovnováze vstupního a výstupního výkonu). [7]

1.5 Magnetické udržení

K udržení plazmatu ve vakuové komoře používá fúze s magnetickým udržením silné magnetické pole, které izoluje plazma od okolní atmosféry. Jak již bylo zmíněno, magnetické udržení spoléhá na dlouhou dobu udržení plazmatu při jeho nízké hustotě.

1.5.1 Princip tokamaku

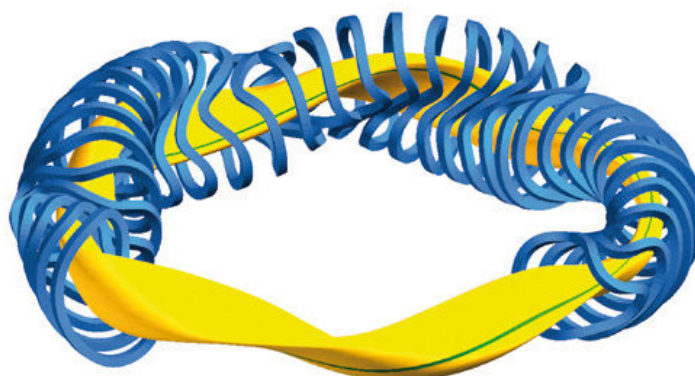
Zařízení tohoto typu patří společně se stelarátorem mezi nejslibnější řešení k dosažení energeticky využitelné fúze. Termín tokamak vychází z ruského jazyka ***TO***roidal'naja ***KA***mera i ***MA***gnitnyje ***K***atuški neboli *toroidální komora a magnetické cívky*. Koncepce tokamaku vznikla mezi lety 1950-1952 týmem ruského fyzika A. Sacharova v bývalém Sovětském svazu. Tokamak se skládá z prstencové vakuové komory, která je obklopena magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem. V tokamaku rozlišujeme dva směry - toroidální a poloidální (obr. 5). Magnetické cívky vytváří toroidální magnetické pole, zatímco transformátor vytváří poloidální magnetické pole. Součtem těchto dvou magnetických polí vzniká šroubovice, která spoutává plazma. Indukovaný proud současně plazma účinně ohřívá. Tato indukce elektrického proudu je jedním z hlavních faktorů úspěchu tokamaků. [8]



Obrázek 5: Základní schéma koncepce tokamaku. [8]

1.5.2 Princip stelarátoru

Stelarátor byl vynalezen týmem amerického vědce Lymana Spytzera v roce 1951. Narozdíl od tokamaku, stelarátor pracuje pouze s toroidálním magnetickým polem. V jeho plazmatu neteče elektrický proud a díky tomu jsou vhodné pro nepřetržitý provoz, zatímco tokamaky pracují v pulzním režimu. Jeho konstrukce je však daleko složitější, zejména pak cívky, proto v šedesátých a sedmdesátých letech stelarátory zaostaly za tokamaky, ale dnes díky obrovskému pokroku na poli výpočetní techniky se podařilo vyrobit takové tvary cívek magnetického pole, že jejich doba udržení je dnes daleko lepší.



Obrázek 6: Magnetické cívky a plazma stelarátoru Wendelstein 7-X. [9]

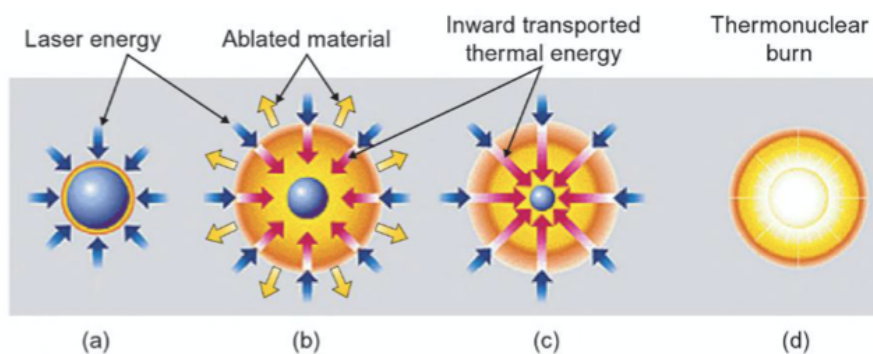
1.6 Inerciální udržení

Inerciální udržení využívá odlišný způsob udržení plazmatu jako je tomu u tokamaků a steralátorů. Při velmi silném stlačení paliva na hustotu přibližně 10^{31} jader/ m^3 stačí udržet plazma pouze po dobu 10^{-10} s. Čas potřebný pro průběh reakce zařídí setrvačnost, neboli tzv. inercie. Neřízený proces inerciálního udržení můžeme pozorovat např. ve vodíkových bombách, využití v energetice si však žádá proces řízený. Požadované stlačení paliva není nikterak snadné a vyžaduje koncentraci vysoké energie na velmi malý palivový terč. To je možné dosáhnout např. lasery, avšak výkon současných laserů je nedostatečný pro zapálení jaderné fúze.

Důležitým úkolem inerciálního udržení, je dosažení rovnoměrné a přitom dostatečně silné komprese palivového terče. Nerovnoměrné stlačení terče vede k vysokým energetickým ztrátám a brání tedy dosažení cílové hustoty a teploty palivového terče. Z tohoto důvodu byly zkoumány dvě metody stlačení terčů:

- s přímým zapálením
- s nepřímým zapálením

Při přímém zapálení jsou lasery směřovány přímo na palivový terč, kdežto u nepřímého zapálení je terč vložen do malé komory a stlačován odraženými paprsky. [10]



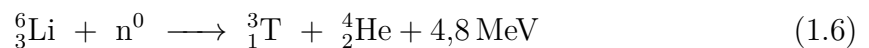
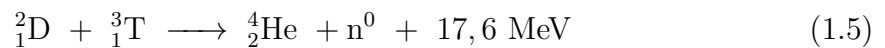
Obrázek 7: (a) ohřev, (b) komprese, (c) zapálení, (d) fúze. [11]

Energetická využitelnost inerciálního udržení je ale stále velmi vzdálená. Účinnost velkých laserů je v současné době menší než 1 % a opakovací frekvence je přibližně jeden výstřel za hodinu. Reaktor s tímto udržením stále spotřebuje nesrovnatelně více energie pro vlastní potřebu než jiné typy reaktorů. Pokud bychom chtěli využít energii

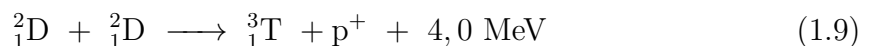
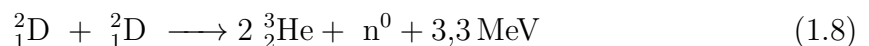
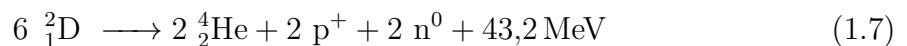
z inerciální fúze, je zapotřebí účinnost laserů vyšší než 10 % a několik výstřelů za sekundu. Díky povaze těchto typů reaktorů je první stěna reaktoru zatížena silnými mechanickými rázy a pulsním tepelným výkonem, kde každé zapálení palivového terče je malou explozí o síle několika desítek kilogramů TNT.

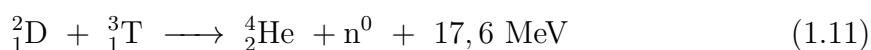
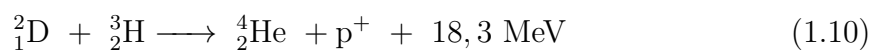
1.7 Fúzní reakce

V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader izotopů vodíku deuteria a tritia (1.5), protože z dostupných fúzních reakcí umožňuje vytvořit energetický zisk nejsnáze. Deuterium je přírodní látka, která se na Zemi hojně vyskytuje jako součást vody. Tritium vzniká přirozeně nejčastěji vlivem ionizujícího kosmického záření ve vrchních vrstvách zemské atmosféry a uměle v jaderných reaktorech. Na Zemi se ale prakticky nevyskytuje, protože není stabilní a rozpadá se na izotop helia ${}^3_2\text{He}$. Proto se musí získat jadernou reakcí lithia s neutrony (1.6) vznikajícími při fúzní reakci přímo v reaktoru. Celkový proces lze zjednodušeně zapsat jako souhrnnou reakci deuteria a lithia se vznikem helia (1.4):



Druhá generace fúzních reaktorů bude využívat slučování jader deuteria (1.9) a lithium již nebude nutné. Většina existujících zařízení pracuje s deuteriem, dosažení energetického zisku DD reakce (1.8) je však obtížnější než v případě DT reakce (1.5). Reakční proces lze zapsat jako reakci šesti jader deuteria za vzniku dvou jader helia, dvou protonů, dvou neutronů a uvolnění 43,2 MeV energie: [8]





V pozdějších generacích fúzních reaktorů bude využívána tzv. bezneutronová fúze, např. fúzní reakce jader vodíku a boru (1.12), při které vznikají pouze elektricky nabitě částice udržitelné magnetickým polem reaktoru:



Bezneutronová fúze odstraní sekundární aktivaci konstrukce reaktoru fúzními neutrony a otevře cestu pro přímé magnetohydrodynamické generování elektrické energie bez použití termodynamického cyklu. Její dosažení je ale podmíněno výrazným pokrokem v oblastech fyziky plazmatu a fúzních technologií. [1]

Aby totiž mohla HB reakce proběhnout (1.12), potřebujeme téměř desetkrát větší zápalnou teplotu v porovnání s DT reakcí (1.5), v řádech miliard Kelvinů (cca $1,6 \cdot 10^9 \text{ K}$).

1.8 Bezpečnost

Narozdíl od spalování fosilních paliv nebo štěpení atomových jader nemůže jaderná fúze v pozemských podmínkách samovolně existovat, v tomto smyslu je jaderná fúze vnitřně bezpečná. K ukončení fúzní reakce stačí jakékoliv narušení pracovních podmínek, zároveň v určitý moment obsahuje fúzní reaktor pouze jednotky gramů paliva - vodíkových izotopů. Pokud by tedy došlo k úniku paliva do ovzduší, nedojde k ohrožení životního prostředí. Přesto bude výstavba prvních fúzních reaktorů provedena dle standartních, velmi přísných bezpečnostních pravidel pro jaderné elektrárny. [8]

1.8.1 Sekundární radioaktivita

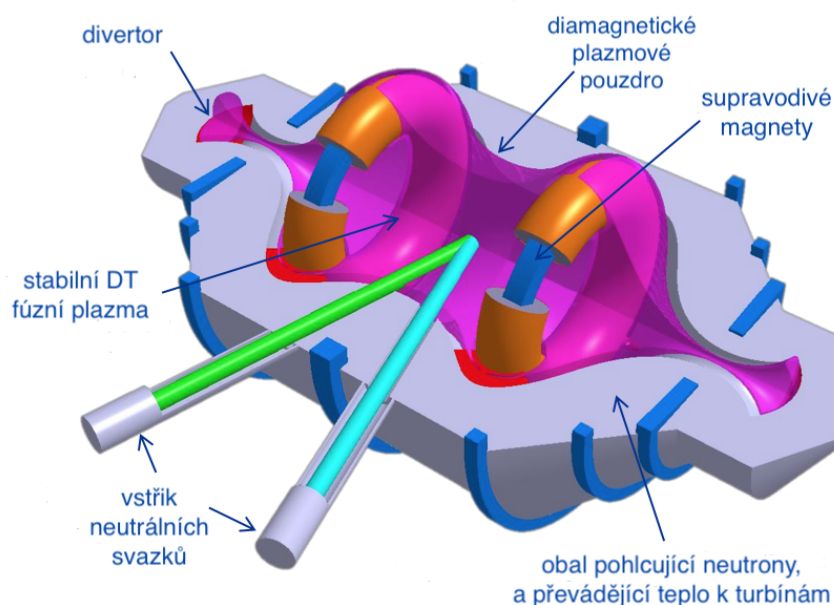
V prvních generacích fúzních reaktorů budou nositeli energie vysokoenergetické neutrony. Tyto neutrony způsobí sekundární radioaktivitu vnitroreaktorových komponent reaktoru. Objemově však půjde o malé množství speciálních nízkoaktivovatelných materiálů. [8]

2 Koncepce kompaktních fúzních reaktorů

Vzhledem k obrovským investicím a nákladům na fúzní reaktory, které přesahují i stovky miliard korun (jako je tomu u mezinárodního projektu ITER), vznikla snaha na vývoj kompaktnějších reaktorů o menších výkonech, které by i přes malé rozměry dokázaly zásobit elektřinou desítky tisíc domácností, nebo například sloužit pro odsolování mořské vody, vzhledem k energetické náročnosti této technologie. Se zmenšením rozměrů fúzních reaktorů přichází i další využití v dopravních prostředcích, jako jsou například lodě a letadla, která by mohla létat i celý rok bez nutnosti „tankování“. Kompaktní fúzní reaktory také otevírají bránu objevování vesmíru díky mnohem výkonějšímu pohonu s využitím fúze.

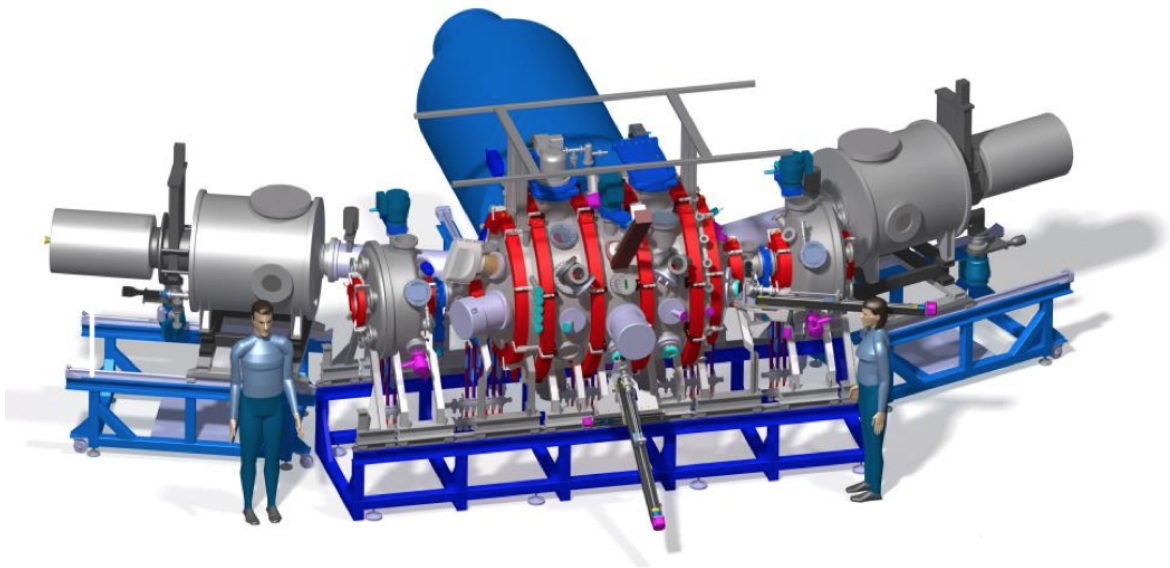
2.1 Lockheed Martin CFR

CFR neboli *Compact Fusion Reactor* je kompaktní fúzní reaktor vyvíjený divizí Skunk Works firmy Lockheed Martin pod vedením Thomase McGuirea. Tato divize stojí za projekty jako SR-71 Blackbird, F-117 Nighthawk, nebo F-35 Lightning. CFR se výrazně odlišuje od klasických tokamaků. Plazma zaujímá tvar sloupce, který je držený magnetickými poli mezi dvěma magnetickými zdrcadly.



Obrázek 8: Komora reaktoru Lockheed Martin CFR T5. [12]

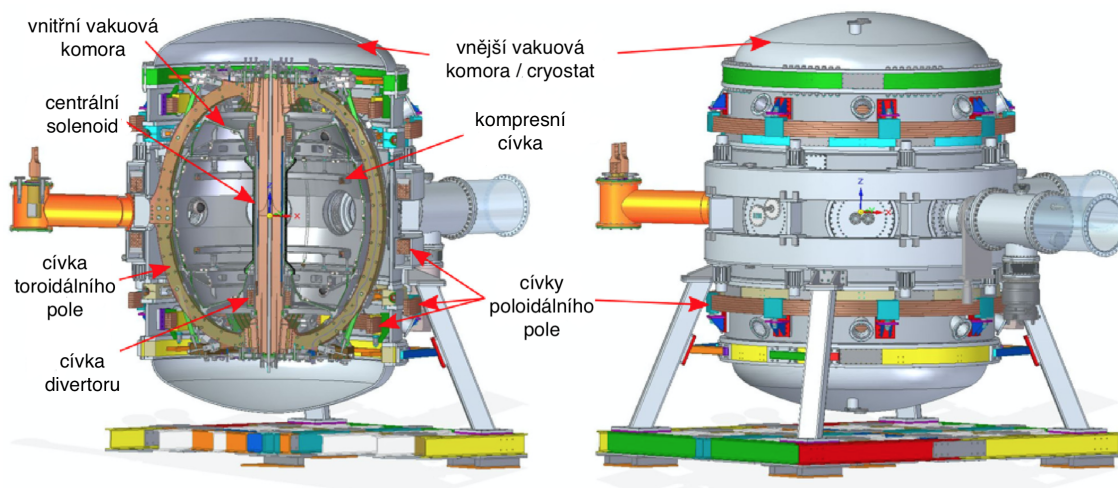
Ohřev plazmatu probíhá dvěma způsoby - vysokofrekvenčním ohřevem, kde se v důsledku rezonancí elektromagnetických vln plazma zahřívá, a neutrálními svazky, které snadno proniknou magnetickým polem, zachytí se v plazmatu a předají mu svoji energii. Snahou Thomase McGuirea, je v řádech let postavit reaktor o výkonu 100 MW, který se vleze na korbu nákladního auta a bude schopný zásobovat menší město do 100 000 obyvatel i v odlehlých koutech světa a rozvojových zemích. Kompaktní fúzní reaktory by také mohly srazit cenu odsolování mořské vody o 60 % a zajistit tak dostatek pitné vody v místech, kde je jí nedostatek.



Obrázek 9: Reaktor Lockheed Martin CFR T5. [12]

2.2 Tokamak Energy ST40

Tento reaktor typu ST (spherical tokamak) vyvíjí britská soukromá společnost Tokamak Energy. Nedávný pokrok ve vývoji vysokoteplotních supravodičů (HTS) a výhodné závislosti přenosu elektronů na toroidálních polích ve sférických tokamacích zaznamenal velký pokrok těchto typů reaktorů. Díky vysokému součiniteli β (udává poměr mezi tlakem plazmatu a magnetickým tlakem), kterého bylo dosaženo v ST reaktorech je možné dosáhnout mnohem menších rozměrů reaktoru. Hlavními komponenty reaktoru ST40 jsou vnitřní a vnější vakuové komory a magnetické cívky, které vyvábí toroidální i poloidální magnetické pole. Vnější komora je podepřena čtyřmi nohama a celý reaktor stojí na platformě, která umožňuje přístup zespodu reaktoru. [13]



Obrázek 10: Reaktor ST40 s popisem hlavních komponent. [13]

2.2.1 Vnitřní a vnější vakuová komora

ST40 bude mít dvou-komorový vakuový systém, který se skládá z vnitřní a vnější vakuové komory. Vnitřní vakuová komora je vyrobená z 30 mm nerezové oceli, středová trubka je vyrobena ze 4 mm slitiny Inconelu. Tlak ve vnitřní komoře bude přibližně 10^{-8} mbar. Vakuum ve vnější komoře bude podstatně nižší, kolem 10^{-4} mbar. Hlavním účelem sekundárního vakua je zabránit zamrznutí cívek toroidálního magnetického pole a zároveň fungovat jako izolátor mezi komorami.

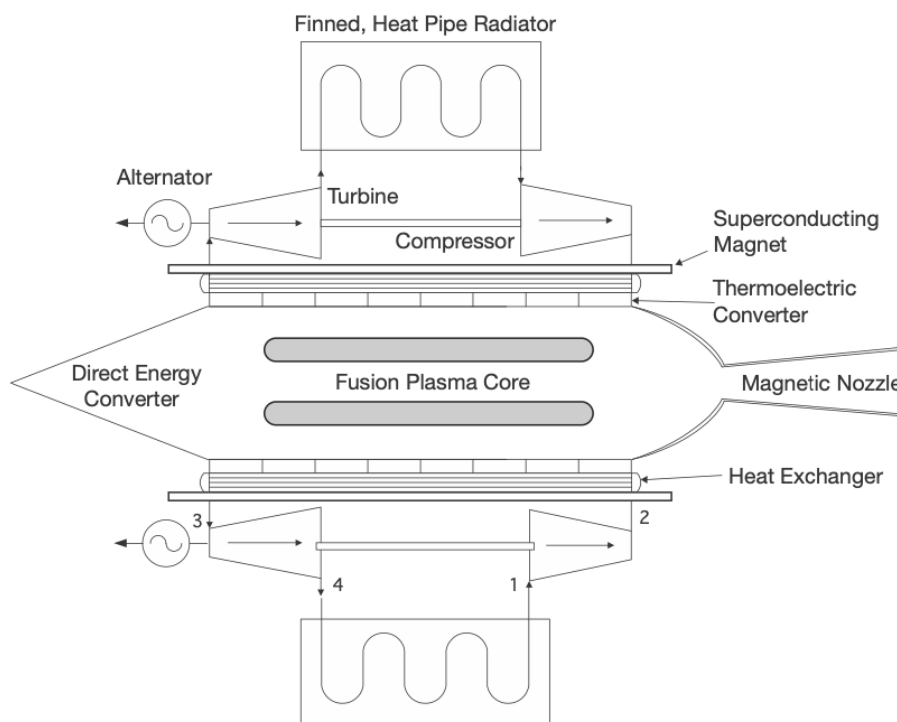
2.2.2 Magnetické pole

Všechny cívky reaktoru ST40 jsou z mědi. Měď je velmi dobře otestována, má dobrou pevnost a vodivost, zejména v teplotách tekutého dusíku. Magnety toroidálního pole společně s magnety poloidálního pole slouží ke „spoutání“ plazmy, a udržení plazmy dál od stěn vnitřní vakuové komory. Nabité částice plazmy následují magnetické siločáry obíhající kolem středové osy tokamaku. Cívky poloidálního pole ovládají tvar a pozici plazmy. Vlastnosti plazmy jsou silně ovlivněny jejím tvarem a tyto cívky pomáhají vytvořit optimální fúzní podmínky. Solenoid v ST40 se využívá spíše k udržování proudu plazmy namísto jeho generování a cívky divertoru natahují plazma ve svislém směru. Nebýt závislý na solenoidu je velká výhoda ST reaktorů, vzhledem k omezenému prostoru ve středu reaktoru.

2.3 Paprskový fúzní reaktor pro vesmírný pohon CBFR-SPS

Objevování Sluneční soustavy (a dále) si vyžaduje pohonné jednotky, které daleko převyšují nejlepší dostupné chemické nebo elektrické pohonné systémy. FRC (Field-Reversed Configuration) je slibným konceptem, který poskytuje jednoduchost, vysoký tah a vysokou měrnou hustotu výkonu. CBFR neboli *Colliding Beam Fusion Reactor* je vylepšenou verzí FRC, kde teplota iontů přesahuje stovky keV.

Tato konfigurace reaktoru je bezneutronová (není radioaktivní), jako palivo tedy využívá směs vodíku a boru (H-B). Fúzní produkty této reakce jsou ionty helia a α -částice. Analýza ovšem ukázala, že tento typ reaktoru by mohl využívat i jiná paliva, např. D-D, D-T, D-He, H-Li s výkonem v širokém rozsahu.



Obrázek 11: Vesmírný pohonný systém s paprskovým fúzním reaktorem CBFR-SPS. [14]

Iontové paprsky vodíku a boru jsou vstřikovány tangenciálně do fúzního jádra, aby poskytly proudový pohon a doplnili reaktor palivem, díky tomu má plazma velkou úhlovou rychlost. Rychlost vstřikovaného vodíku a boru je stejná, ale jejich energie se liší. Přímý konvertor energie zachycuje přibližně polovinu α -částic, zpomaluje je inverzním

cyklotronovým procesem a přeměňuje jejich kinetickou energii na elektrickou energii. Magnetická tryska směřuje zbývající α -částice do vesmíru jako tah. Bremstrahlungovo záření je přeměněno na elektrickou energii pomocí termoelektrického měniče energie. Bremstrahlungova energie, která není přeměněna termoelektrickým měničem energie je předávána tepelnému motoru v Braytonově cyklu. Odpadní teplo se odvádí do vesmíru. Systém řízení výkonu monitoruje všechny zdroje a propady elektrické a tepelné energie, aby udržoval provoz systému v ustáleném stavu a poskytoval nezávislý zdroj energie, tj. palivové články, baterie atd., pro zahájení provozu reaktoru z vypnutého stavu.

Systém poháněný D-T nebo D-He palivem bude pravděpodobně mnohem složitější než je znázorněno na obr. 11. Tyto palivové cykly produkují podstatně více energetického výkonu vystřelujícími neutrony, a proto musí být jejich energie přeměněna v tepelném cyklu a poté do tahu. Tyto systémy vyžadují masivní radiační štít a silnější konstrukci. CBFR vyžaduje přibližně 50 MW příchozího výkonu. Reakce H-B generuje přibližně 77 MW jaderné energie, z čehož polovina je získána v přímém konvertoru energie s 90 % účinností. Hlavním zdrojem tepla v CBFR-SPS je Bramstrahlungovo záření. Termoelektrický měnič převede přibližně 20 % tohoto záření, neboli 4,6 MW a 18,2 MW na převede do Braytonova tepelného motoru. Braytonův tepelný motor, který dodává dalších 7 MW energie do reaktoru se skládá z tepelného výměníku, alternátoru, turbíny a kompresoru. Zbylých 11 MW se teplem odvádí do vesmíru. Braytonův tepelný motor je efektivní možnost převést přebytečné teplo „odmítnuté“ termoelektrickým měničem. Účinnost termodynamického cyklu je omezena maximální teplotou, kterou je materiál schopný unést. [14]

CBFR-SPS slibuje mnoho benefitů pro pokročilý vesmírný pohon. Mnohé z technologií potřebných k realizaci CBFR-SPS existují, nebo by mohly být vyvinuty v relativně krátkém časovém rámci. Vývoj a testování by mohlo být provedeno na malém zařízení o menším výkonu. Použití H-B paliva minimalizuje potřebu masivního radiačního štítu. Vysoký součinitel β , magnetická konfigurace a použití energetických iontů usnadňují použití existujících paliv získatelných na naší planetě a možná by umožnili doplňování paliva na jiných planetách. Modulární konstrukce CBFR-SPS by pak mohla poskytovat výkon vesmírným stanicím.

2.3.1 Parametry CBFR pro výkon 100 MW

Tabulka 1: Parametry fúzního reaktoru pro 100 MW CBFR. [14]

| | D-T | D-He | H-B |
|--|------|------|------|
| Celkový výstupní výkon, P_0 (MW) | 100 | 100 | 100 |
| Fúzní energie (MeV) | 17.4 | 18.2 | 8.68 |
| Hustota $\times 10^{15}$ (cm $^{-3}$) | | | |
| n_1 | 0.5 | 0.33 | 0.5 |
| n_2 | 0.5 | 0.33 | 0.1 |
| Iontová energie paliva (keV) | | | |
| $\frac{1}{2}m_1V_1^2$ | 300 | 450 | 300 |
| $\frac{1}{2}m_2V_2^2$ | 450 | 675 | 3300 |
| Teplota (keV) | | | |
| T_i | 96 | 217 | 235 |
| T_e | 100 | 170 | 85 |
| Magnetické pole (kG) | | | |
| B_0 | 5.88 | 8.25 | 15.3 |
| $B_0 + B_m$ | 94.7 | 121 | 96.3 |
| Jaderný (částicový) výkon, P_N (MW) | 99 | 84 | 77 |
| Radiační výkon, P_R (MW) | 0.9 | 15.9 | 22.8 |
| Recirkulační výkon, P_C (MW) | 6.9 | 11.8 | 38 |
| $Q = P_N/P_R$ | 112 | 5.28 | 3.84 |
| P_C/P_N | 0.07 | 0.14 | 0.49 |
| Poloměr plazmy (m) | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Šířka plazmy (cm) | 3.8 | 6.8 | 10.3 |
| Poloměr první stěny (m) | 0.42 | 0.42 | 0.42 |
| Tloušťka stěny komory (m) | 3.2 | 0.2 | 0.2 |
| Délka komory (m) | 1.1 | 4.6 | 6.9 |
| Objem komory (m 3) | 45.3 | 5.6 | 8.3 |

Tabulka 2: Parametry pohonu pro 100 MW CBFR-SPS. [14]

| | D-T | D-He | H-B |
|--|------|------|------|
| Specifický impuls $I_{sp} \times 10^6$ (s) | 1.3 | 1.4 | 1.4 |
| Výkon v tahu, P_T (MW) | 29.9 | 67.8 | 50.8 |
| P_T/P_0 | 0.3 | 0.68 | 0.51 |
| Tah, T (N) | 3.8 | 9.6 | 28.1 |
| T/P_0 (mN/MW) | 37.8 | 95.5 | 281 |

Tabulka 3: Hmotnost jednotlivých komponent pro 100 MW H-B CBFR-SPS. [14]

| | |
|---|------------------|
| Braytonův tepelný motor | 18 000 |
| Chladiče (hliníkový kompozit) | 6 000 |
| Supravodivý magnet (Nb_3Sn) | 3 097 |
| Přímý konvertor energie | 1 690 |
| Magnetická tryska | 1 690 |
| Vnější skořepina (kompozit) | 772 |
| Vnější izolační plášť (pěna s nízkou hustotou) | 643 |
| Akumulátorová baterie (počáteční spuštění) | 500 |
| Termoelektrický měnič | 400 |
| Recirkulace/chlazení tekutým heliem (15 kW) | 60 |
| Vstřikovače iontového paprsku (3 pro vodík i bor) | 50 |
| RF napájení | 30 |
| Elektronika řídicího systému | 30 |
| Zdroj iontů | 10 |
| Celková hmotnost | 32 972 kg |

3 Plazma

Plazma je často označováno jako čtvrté skupenství hmoty. I když se na Zemi vyskytuje plazma velmi zřídka (blesk, polární záře), přibližně 99 % veškeré hmoty ve vesmíru je v tomto stavu. Název plazma pro ionizovaný plyn poprvé použil Irving Langmuir (1881–1957) v roce 1928. Přírodním způsobem doplňuje řadu pevná látka – kapalina – plyn. Dodáme-li další tepelnou energii plynu, dojde k jeho částečné a později úplné ionizaci. [15]

Zjednodušeně můžeme říct, že plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. Z rovnovážného rozdělení a kvazineutrality plyne rovnice (3.1) pro poměrné zastoupení iontů různé násobnosti v plazmatu. Tuto rovnici poprvé odvodil astrofyzik Mehd Nad Saha v roce 1920 a můžeme z ní vyčístit proč se plazma na Zemi vyskytuje velmi zřídka:

$$\frac{P_+^2}{1 - P_+} = CT^{3/2} \exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right) \quad (3.1)$$

kde $C \sim 2,4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, P_+ je stupeň ionizace, U_i je ionizační potenciál plynu, T je teplota plazmatu a k je Boltzmannova konstanta. V momentě, kdy ionizační potenciál plynu U_i začne být porovnatelný s kT se vlivem teploty začne měnit ionizace plynu. Stupeň ionizace se tedy začne rychle zvyšovat a plazma se stává plně ionizované.

3.1 Kvazineutralita plazmatu

V kvazineutrálním plynu je v makroskopickém objemu stejné množství kladně nabitých iontů i záporně nabitých elektronů, tj. prostorová hustota náboje je nulová:

$$\rho_Q = 0 \quad \implies \quad \sum Q_\alpha n_\alpha = 0 \quad (3.2)$$

3.2 Kolektivní chování plazmatu

V plynu, který je složený jen z neutrálních částic, se částice ovlivňují jen v případě jejich srážky. Avšak v ionizovaném plynu se částice mohou ovlivňovat i na velké vzdálenosti

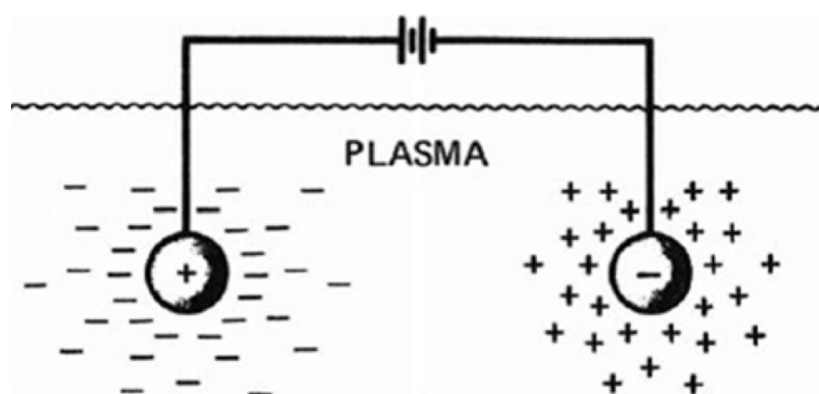
díky elektrickým polím, která se vytvořila nabitými částicemi. Vzdálenost silového působení určuje tzv. Debyeova stínící délka.

3.3 Debyeovo stínění

Je jedním z fundamentálních zákonů fyziky plazmatu, který stanovuje charakteristickou vzdálenost λ_D , neboli Debyeovu stínící délku. Vliv jakékoliv místní nestability je odstíňován ostatními okolními náboji a potenciál klesá exponenciálně se vzdáleností. Debyeova délka závisí na hustotě nositelů náboje a lze ji vypočíst ze vztahu:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n e^2}} \quad (3.3)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T je absolutní teplota, n je hustota náboje a e je elementární náboj elektronu. Velikost veličiny λ_D nás informuje o tom, zda můžeme daný soubor elektricky nabitých částic považovat za plazma. Klesne-li Debyeova stínící délka pod vzdálenost jednotlivých nabitých částic, nepřekročí vliv částice prakticky hranici nejbližších sousedů. Částice tedy můžeme považovat za nezávislé a soubor nemá vlastnosti plazmatu. V opačném případě, kdy λ_D značně přesahuje vzdálenosti mezi částicemi, je vzájemné působení jednotlivých nábojů velmi silné a místní vnější podnět se přenáší a působí na široké okolí. Chování částic pak lze označit jako „kolektivní“.[16]



Obrázek 12: Debyeovo stínění [17]

3.4 Langmuirova frekvence

Zrození fyziky plazmatu započalo objevem plazmových kmitů v částečně ionizovaných plynech (1927). Působením coulombovských sil dalekého dosahu vzniká uspořádaný pohyb nabitých částic a nestability v plazmatu. Plazma se vychyluje ze své rovnovážné polohy a elektrostatickými silami je nuceno obnovit svůj předchozí stav, v důsledku toho začne kmitat. Tento jev může být popsán vztahem:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e}} \quad (3.4)$$

kde m_e je hmotnost elektronů a ε_0 permitivita ve vakuu. [16]

4 Vlastnosti sodíku

Důvodem použití tekutého sodíku jako chladicího média ve fúzních reaktorech jsou jeho výborné fyzikální a teplotní vlastnosti. V přírodě se sodík, stejně jako ostatní alkalické kovy vyskytuje pouze ve sloučeninách. Předpokládá se, že Zemská kůra obsahuje 2,3 - 2,6 % tohoto prvku, což je nejvíce ze všech alkalických kovů a zároveň šestý nejběžnější prvek na Zemi.

4.1 Fyzikální vlastnosti

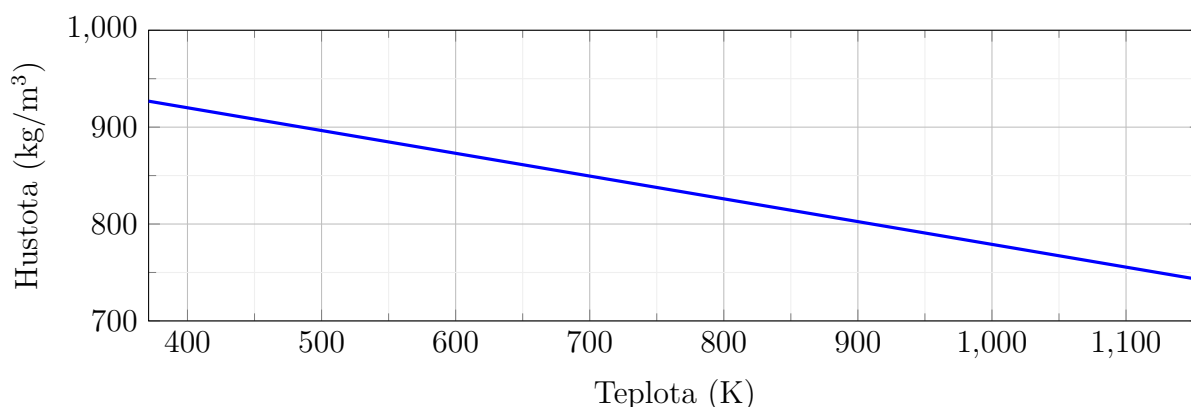
V periodické tabulce chemických prvků zaujímá sodík jedenácté místo s atomovou hmotností $22,9898 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. V přírodě se vyskytuje pouze jeden stabilní izotop sodíku ^{23}Na , patří tedy do skupiny monoizotopických prvků (chemický prvek, který má pouze jeden stabilní izotop). Ostatní izotopy sodíku jsou radioaktivní, nejstabilnější z nich jsou izotopy ^{22}Na s poločasem rozpadu 2,6 roku a ^{24}Na s poločasem rozpadu 15 hodin.

Sodík má teplotu tání $97,81^\circ\text{C}$ a při změně skupenství z tuhé fáze na kapalnou se jeho objem zvětší o 2,7 %. Teplota varu sodíku se udává $882,8^\circ\text{C}$ při atmosférickém tlaku. [18]

4.1.1 Hustota

Hustota sodíku je menší než voda. Na grafu níže můžeme vidět změnu hustoty v rozsahu teplot $371 \div 1156$ Kelvinů, tj. od teploty tání do teploty varu. Doporučený způsob výpočtu hustoty tekutého sodíku v tomto rozsahu je interpolační funkcí dle (4.1): [19]

$$\rho_{Na} = 1014 - 0.235 \cdot T \quad (4.1)$$



4.1.2 Dynamická a kinematická viskozita

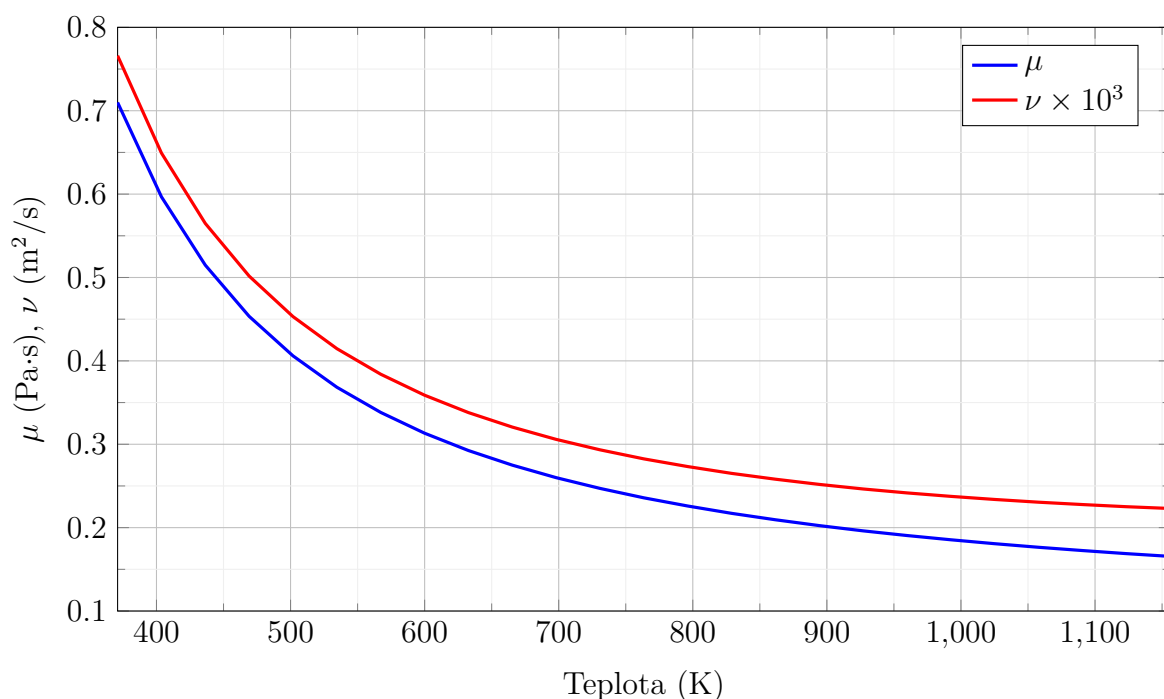
Viskozita je důležitou vlastností tekutin. Můžeme říct, že je to míra odporu tekutiny vůči proudění.

Dynamickou viskozitu vypočteme podle interpolační funkce (4.2): [19]

$$\ln \mu_{Na}(T) = \frac{795.45}{T} - 2.4868 \quad (4.2)$$

Kinematická viskozita je vyjádřena podílem dynamické viskozity ku hustotě (4.3):

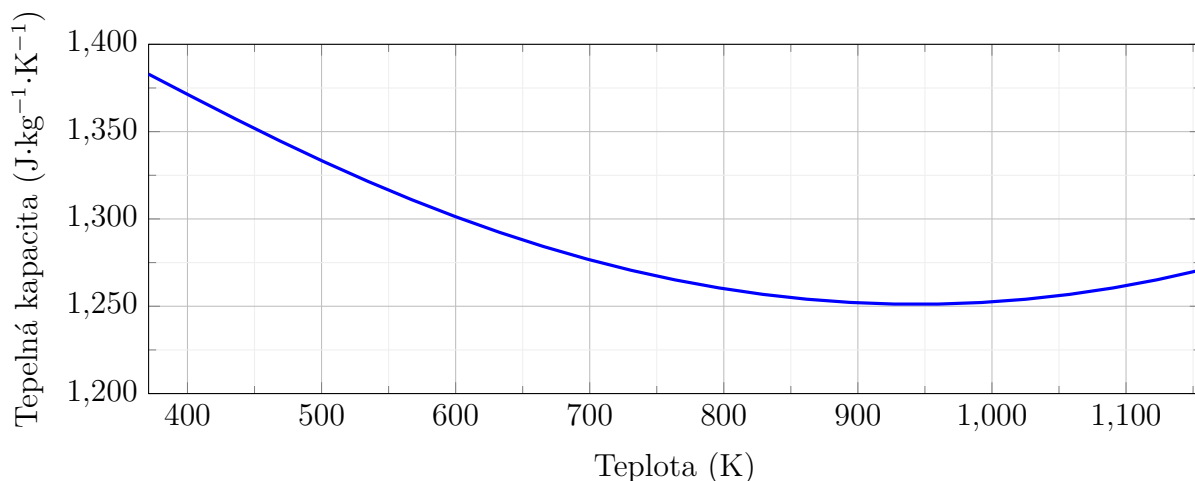
$$\nu_{Na} = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.3)$$



4.1.3 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita je jedna z nejdůležitějších vlastností chladiwa. I přes obtíže, které existují při měření tepelné kapacity tekutých kovů, byla tepelná kapacita pro tekutý sodík určena s velkou přesností za atmosférického tlaku. Pro výpočet tepelné kapacity tekutého sodíku použijeme interpolační funkci dle Kirillova (4.4): [19]

$$c_{pNa} = -3.001 \times 10^6 \cdot T^{-2} + 1658 - 0.8479 \cdot T + 4.454 \times 10^{-4} \cdot T^2 \quad (4.4)$$

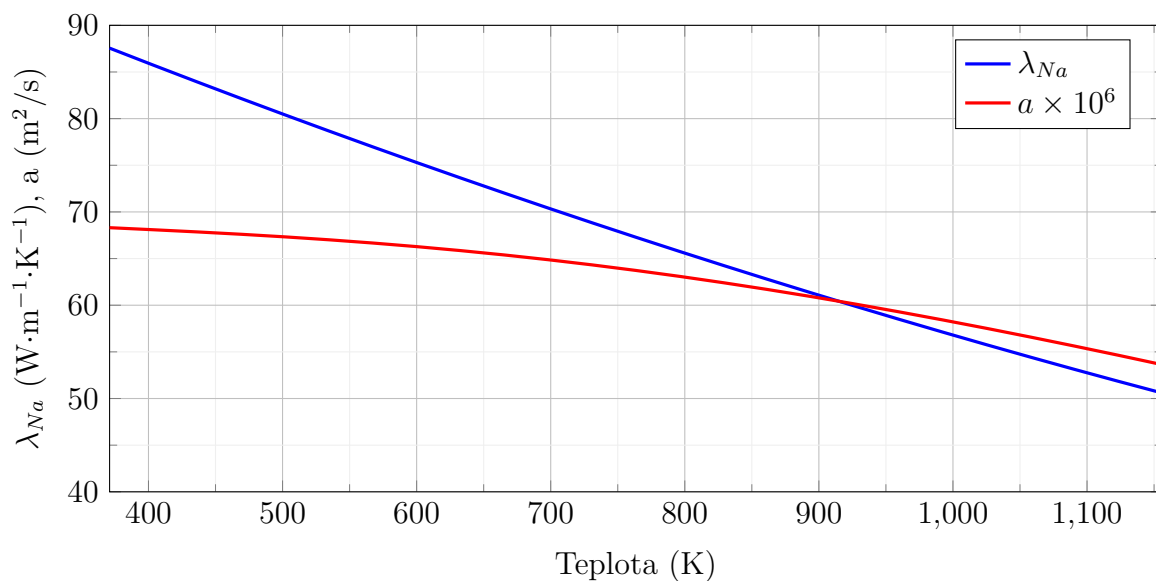


4.1.4 Součinitel tepelné a teplotní vodivosti

Tepelná vodivost, je schopnost dané látky vést teplo. Od chladiva chceme co nejvyšší tepelnou vodivost. Čím větší má chladivo tepelnou vodivost, tím více tepla může odebrat z tepelného zásobníku. Nejpřesnější výpočet součinitele tepelné vodivosti dosáhneme použitím parabolické rovnice (4.5). Součinitel teplotní vodivosti a je schopnost daného materiálu vyrovnávat rozdíly teplot. Vypočteme ho jako podíl součinitele tepelné vodivosti ku součinu hustoty a tepelné kapacity (4.6). [19]

$$\lambda_{Na} = 110 - 0.0648 \cdot T + 1.16 \times 10^{-5} \cdot T^2 \quad (4.5)$$

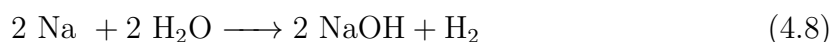
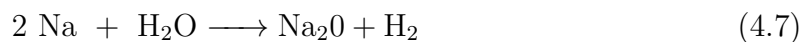
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4.6)$$



4.2 Chemické vlastnosti

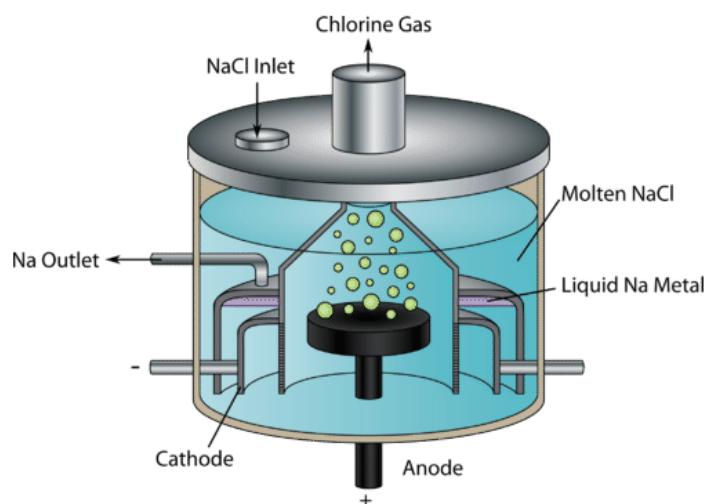
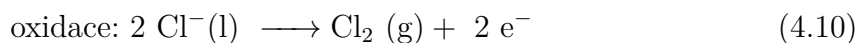
Sodík je stříbrnobílý, velmi měkký kov. Na vzduchu je sodík nestálý a rychle se pokrývá vrstvou hydroxidu sodného (NaOH). Prudce reaguje s vodou za vzniku NaOH, tato reakce je silně exotermní, vzniká nebezpečný vodík, který se vzduchem tvoří výbušnou směs. [20]

Reakce sodíku s vodou:



4.3 Průmyslová výroba sodíku

Sodík se vyrábí elektrolýzou taveniny chloridu sodného (NaCl), který je jednou z nejvýznamnějších sloučenin sodíku. Downův článek, ve kterém probíhá elektrolýza je navržen tak, aby se tekutý sodík usazoval na katodě (4.9) a plynný chlor na anodě (4.10), aniž by tyto dva produkty mohly vzájemně reagovat.



Obrázek 13: Downův článek používaný na elektrolýzu taveného chloridu sodného. [21]

5 Sodík v tepelných systémech

Tekuté kovy jsou považovány za skvělá teplotonosná média pro fúzní reaktory z několika důvodů. Díky jejich schopnosti odolat významnému tepelnému zatížení a vysokým teplotám bez vysokého tlaku v systému. Jejich použití je však omezeno nedostatečným porozuměním účinků magnetohydrodynamických (MHD) a termogravitačních konvekci (TGC), ke kterým může dojít v podmínkách fúzního reaktoru, zejména působením velmi silného magnetického pole a teplotního gradientu. Provedené experimenty směřují k získání velmi cenných, a dříve nedostupných informací o společném vlivu MHD a TGC na toky tekutých kovů. Experimenty ukázaly, že účinek magnetického pole a vztlaku může vést k intenzivním výkyvům teplot. [22]

Čistý sodík je relativně nekorozivní a kompatibilní s běžnými konstrukčními materiály, jako jsou austenitické a feritické oceli. To ale neplatí pro oxidy v něm obsažené, které značně zvyšují rychlost koroze materiálů, také způsobují křehnutí a snížení mechanických vlastností ocelí. Proto je nezbytné oceli upravovat, aby byly vhodné na práci v prostředí sodíku. [23]

Jelikož tekuté kovy mají vysoký bod varu, mohou pracovat za vysokých teplot při nízkých tlacích. Vysoká tepelná vodivost sodíku vede k vysokému přenosu tepla a minimalizuje teplosměnné plochy. Sodík je také relativně levný. Je tedy takřka ideální prostředek pro odvod tepla při vysokých teplotách a teplotních tocích. Protože sodík je tuhý při pokojové teplotě používá se předehřívací zařízení v sodíkových systémech, které umožňují plnění a prvotní operace. Dále je nutno ohřívat potrubí a nádrže na minimálně 150 °C.

5.1 Srovnání sodíku s ostatními tekutými kovy

Sodík je vhodný ve srovnání s ostatními tekutými kovy z několika důvodů. Díky jeho velkému zastoupení v Zemské kůře je levný, má nízkou korozní aktivitu a toxicitu, jeho chemická aktivita je ovšem vysoká.

Tabulka 4: Charakteristika tekutých kovů - chladiwa pro jaderná zařízení. [24]

| Prvek | Hojnost prvku v Zemské kůře (%) | Cena (1kg) | Chemická aktivita | Korozní aktivita | Toxicita |
|-------|---------------------------------|------------|-------------------|------------------|----------|
| Na | 2.4 | 1 USD | vysoká | nízká | nízká |
| Li | 0.005 | 60-100 USD | Li < Na | Li > Na | Li > Na |
| K | 2.4 | 4 USD | | | |
| Hg | 5×10^{-4} | | nízká | vysoká | vysoká |
| Pb | 0.016 | 0.5 USD | | | |
| Bi | 10^{-5} | 8.5 USD | | | nízká |
| Na-K | | 3-5 USD | vysoká | nízká | |
| Pb-Bi | | 7 USD | nízká | vysoká | vysoká |

5.2 Příměsi v tekutém sodíku

Přítomnost příměsí značně zhoršuje fyzikální i teplotní vlastnosti sodíku. Příměsi jsou přítomné v okruzích s tekutými kovy ve třech základních fyzikálních stavech:

- v rozpuštěné formě
- v podobě částec nadbytečné pevné fáze
- v podobě usazenin na vnitřních stěnách potrubí

Vztah mezi nimi je určován podstatou příměsi a podmínkami provozu zařízení s chladiwem. Kromě toho se příměsi nacházejí v chladiwu v různých chemických formách: v elementární formě a ve formě chemických sloučenin s okolními atomy kovu, popřípadě atomy jiných příměsí. Předpokládá se, že molekuly obsahující příměsi se při rozpuštění v kovové tavenině disociují (rozkládají) na atomy nebo ionty. Přitom iontová forma se vyskytuje častěji. Teplota a tepelná stabilita molekul určují stupeň jejich disociace v tavenině. Jestliže není afinita atomu příměsi k okolním atomům kovu dostatečně velká, je rovnovážný stav disociace značně posunut ve směru tvorby atomů nebo iontů. Naopak při vysoké afinitě příměsi k atomům okolního kovu je rovnováha posunuta ve směru tvorby sloučenin v tavenině kovu. Příměsi, nacházející se v disociované formě jsou zpravidla chemicky aktivnější. Jestliže atomy nebo ionty nacházející se v tavenině mají značně vysokou chemickou afinitu k jiným atomům příměsí, tvoří v tavenině seskupení, v jejichž rámci vznikají směrované vazby. [23]

Sodík působí jako silné redukční prostředí. Chromové karbidy typu Me_7C_3 a Me_23C_6 v ocelích mají vyšší aktivitu, než uhlík v sodíku, což vede k jejich oduhličování. Hloubka

oduhličení je závislá především na složení exponovaného materiálu a na teplotě. K přenosu uhlíku dochází u monometalických i bimetalických systémů. Oduhličování konstrukčních materiálů může způsobit značné změny mechanických vlastností. [25]

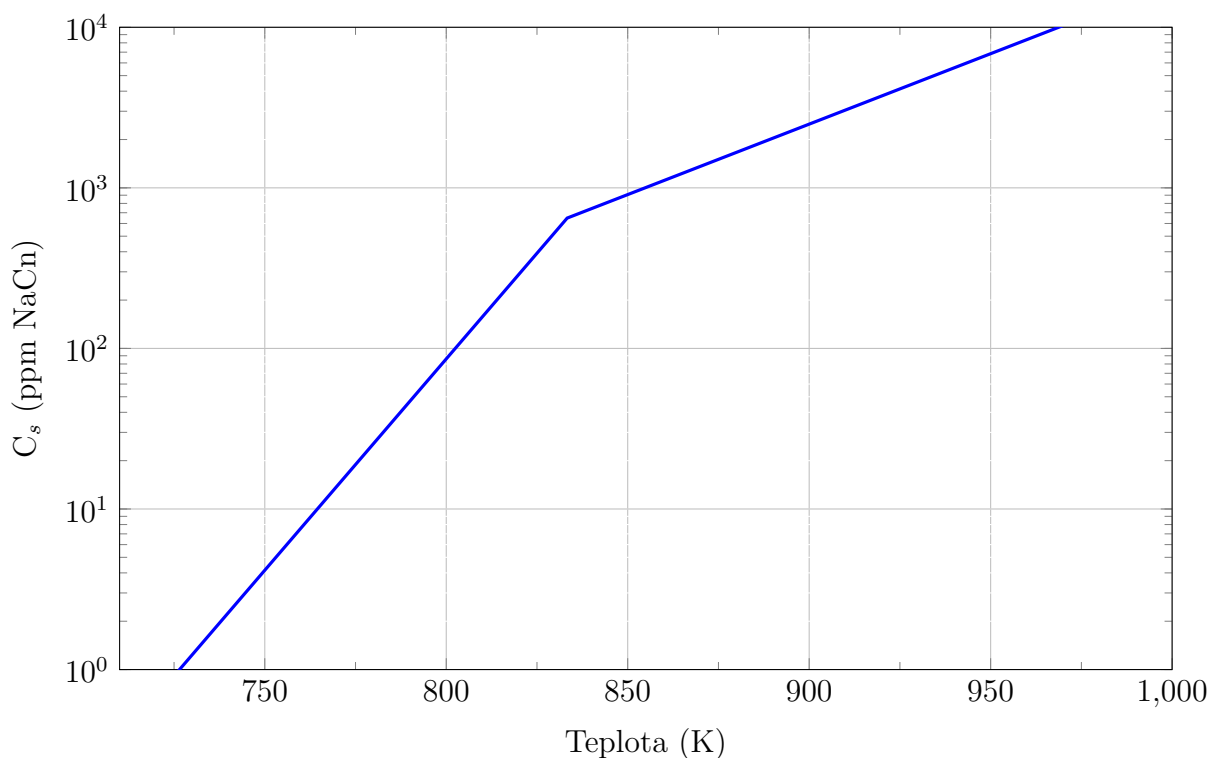
5.2.1 Příměsi obsahující uhlík

V sodíkovém chladiči se nachází uhlík v různých chemických formách - elementární uhlík, acetylid, uhličitán, karbonyl, kyanid. Tyto formy se vzájemně liší svou chemickou aktivitou.

Z celkového množství příměsí uhlíku v sodíku představuje díl nerozpuštěného elementárního uhlíku mezi 40 až 80 %. Elementární uhlík je značně inetrní vůči kovovému sodíku, je to tedy důvod stability této formy příměsí. Při reakci tekutých alkalických kovů s částicemi uhlíku se tvoří amorfní substituční sloučeniny - grafitidy MeC_n . V důsledku proniknutí atomů alkalických kovů dojde k vytvoření jednoatomové vrstvy atomů kovu mezi sousedními uhlíkovými mřížkami, což má za následek „napuchání“ grafitu. Známe tyto grafitidy sodíku: NaC_8 , NaC_{16} , NaC_{30} a NaC_{64} . Při zahřívání dochází k ochuzování grafitidu o kov. Uhličitán sodný Na_2CO_3 je jednou z nejrozšířenějších příměsí obsahujících uhlík v sodíkovém chladiči. Uhličitán sodný je stabilní v přítomnosti sodíku do teploty $400 \div 500^\circ\text{C}$, nad touto teplotou začne docházet k reakci uhličitánu se sodíkem, při které vzniká acetylid. Avšak rozpuštěná forma uhličitánu sodného za přítomnosti značného množství kyslíčnicku sodného může udržet svou stabilitu v sodíku i při vyšších teplotách. Rozpustnost uhličitánu sodného v sodíku činí $50 \div 100 \text{ ppm Na}_2\text{CO}_3$ při teplotě 700°C . Kyanid sodný NaCN je v sodíku rovněž stabilní. Předpokládá se, že kyanid vzniká v prostředí sodíku při teplotách vyšších než 400°C v důsledku katalitické reakce příměsí dusíku s kyanidem. Kyanid sodný se začíná rozkládat na sodík až při teplotách vyšších než 600°C . Jedním z produktů tohoto rozkladu je acetylid sodíku. Rozpustnost kyanidu se prudce zvyšuje se stoupající teplotou. [23]

Rozpustnost kyanidu sodného v sodíku:

$$\log C_s = 13.78 - \frac{9140}{T} \quad (5.1)$$



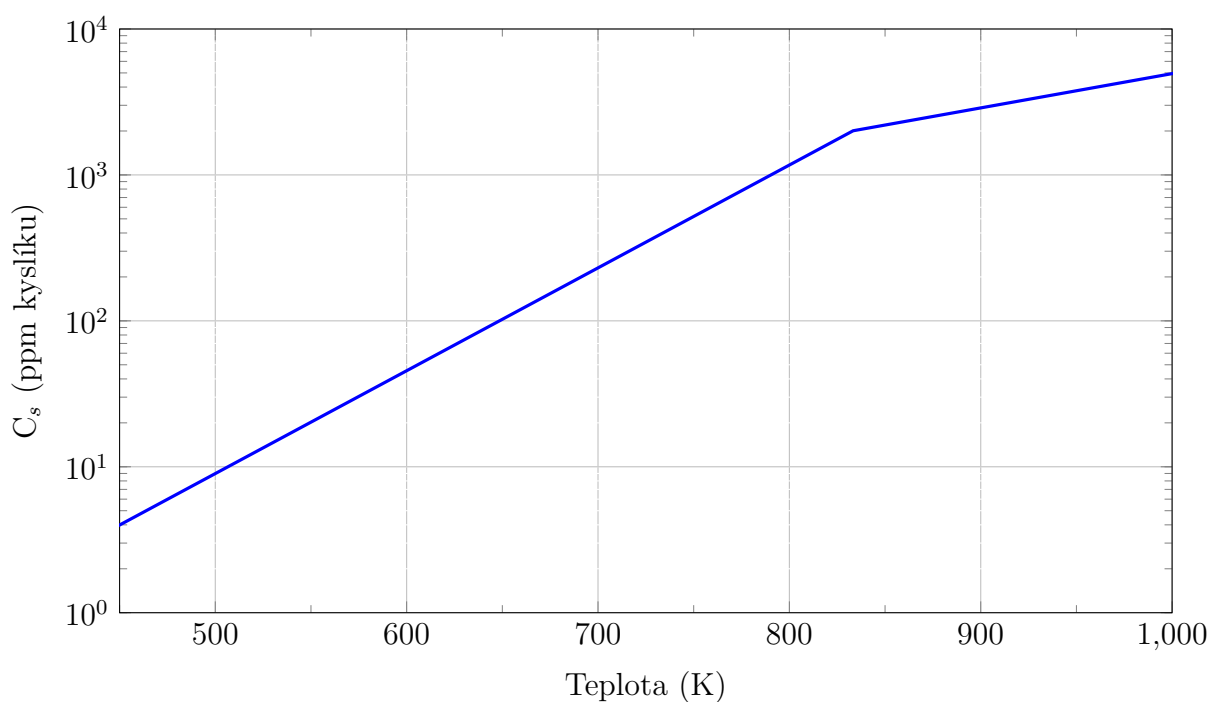
Konečným produktem přeměn příměsí obsahující uhlík je elementární uhlík. Protože je elementární uhlík málo rozpustný, jemně rozptýlený a relativně chemicky inetrní, nedá se účinně zachycovat filtry ani chladnými jímkami a téměř se nepodílí na chemických reakcích. Tato příměs se tedy prakticky neodstraňuje a představuje podstatnou část celkového obsahu uhlíku. Elementární uhlík je poměrně slabým zdrojem nauhličování konstrukčních materiálů. Aktivnější je v těchto procesech uhlík, který je přítomen ve formě sloučenin. Uhličitán a kyanid sodný jsou stabilnější než karbidy chromu, tudíž nemohou být efektivními zdroji nauhličování konstrukčních materiálů. To ale neplatí u acetylidu a karbonylu sodíku. Na druhou stranu jsou tyto sloučeniny stabilnější než karbid železa a mohou se tedy podílet na přenosu uhlíku z uhlíkatých a nízkolegovaných ocelí obsahujících Fe_3C , přes sodíkové chladiivo na nerezavějící chromové a chromniklové oceli. Základní formou chemicky aktivního uhlíku, která se podílí na oduhličování a nauhličování konstrukčních materiálů je acetylid sodíku, jelikož je produktem rozkladu většiny příměsí obsahujících uhlík a jeho stabilita v tekutém sodíku se udržuje až do teploty cca 650 °C. Ke snížení množství acetylidu v sodíku je potřeba provádět účinnou filtraci sodíku od všech nečistot obsahujících uhlík, včetně nerozpustné formy elementárního uhlíku. [23]

5.2.2 Oxidy sodíku a hydroxid sodný

Sodík tvoří s kyslíkem celou řadu sloučenin. V přebytku sodíku je nejstabilnější formou oxid sodný Na_2O . Proto z tekutého sodíku, ve kterém je přebytek kyslíku, vykryštalizovává stechiometrické složení Na_2O . V přebytku kyslíku je nejstabilnější formou peroxid sodný Na_2O_2 . Hydroxid sodný se v přebytku se v přebytku sodíku rozkládá při teplotách nad cca 300 °C, přičemž vzniká oxid sodný a hydrid sodný. Pod touto teplotou může existovat hydroxid v přebytku sodíku značně dlouhou dobu. Reakce vzniku hydridu sodného probíhá nejintenzivněji při teplotě 200 ÷ 350 °C. Při teplotě nad 400 °C se hydrid sodný rozpouští. [23]

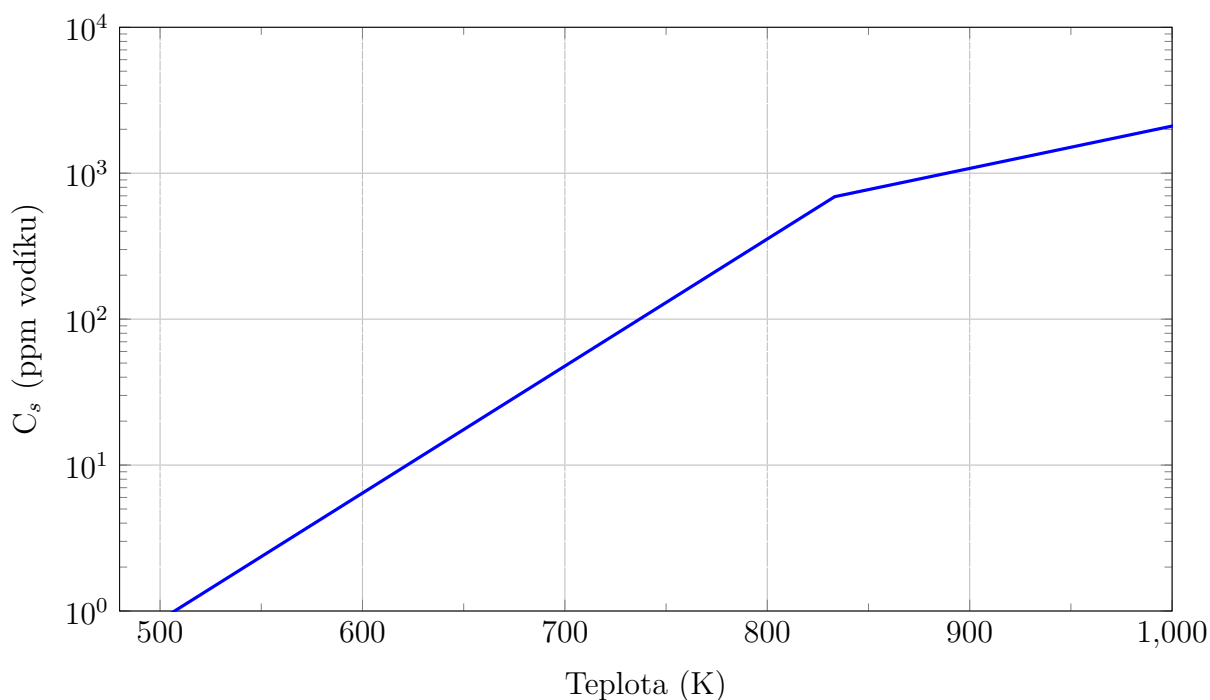
Rozpustnost oxidu sodného v sodíku: [26]

$$\log C_s = 6.239 - \frac{2447}{T} \quad (5.2)$$



Rozpustnost hydridu sodného v sodíku: [23]

$$\log C_s = 6.467 - \frac{3023}{T} \quad (5.3)$$



5.3 Čištění tekutého sodíku

Možných metod čištění sodíku je nepřehledné množství, v současné době jsou ovšem nejpoužívanější chladné jímky, ve kterých dochází ke snížení rozpustnosti většiny příměsí snížením teploty sodíku. [27]

5.3.1 Filtrace

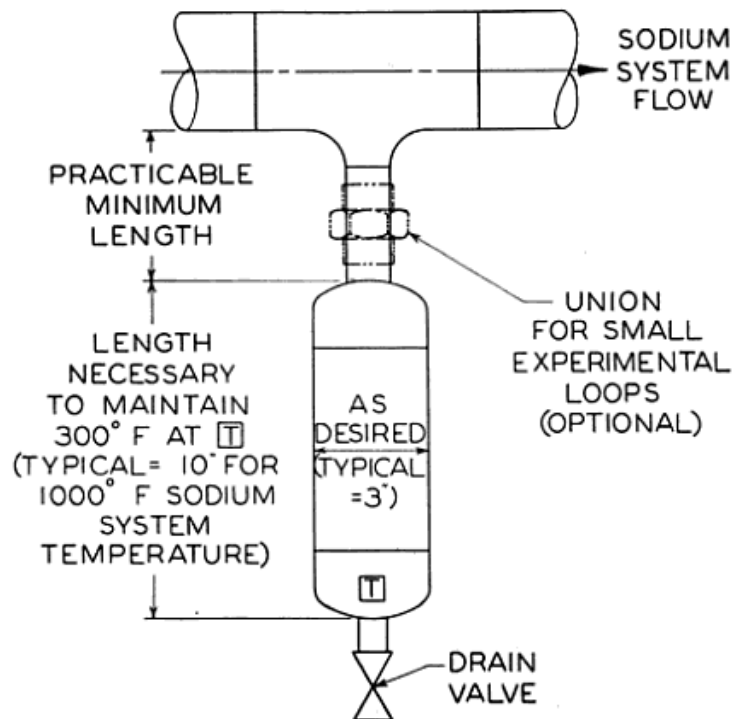
Odstraňování nerozpustných nečistot z tekutého sodíku se nejlépe provádí filtrací. Různá filtrační média zahrnují porézní slinuté kovy a sklo, v menší míře i drátěné tkaniny. Skleněné filtry jsou omezeny na laboratorní podmínky a nízké teploty. Filtry se využijí zejména při plnění sodíku do systému na odstranění hrubého množství oxidů a sedimentu.

5.3.2 Chladné jímky

Tato metoda využívá k odstranění příměsí rozdílu teplot. Nejjednodušší chladnou jímku lze definovat, jako kteroukoliv plochu v systému, která je dost chladná na to, aby se na této ploše začaly tyto příměsí srážet. Oxid sodný, hydrid sodný a další příměsí se stávají nerozpustnými při teplotách blízkých se bodu tání sodíku (97,81 °C).

Chladné jímky můžeme rozdělit do dvou kategorií:

- s volnou cirkulací
- s nucenou cirkulací



Obrázek 14: Příklad chladné jímky s volnou cirkulací [18]

Chladné jímky s nucenou cirkulací jsou standardem ve velkých tepelných systémech. Vhodným materiálem pro chladné jímky je uhlíková ocel, protože jímky pracují při relativně nízkých teplotách.

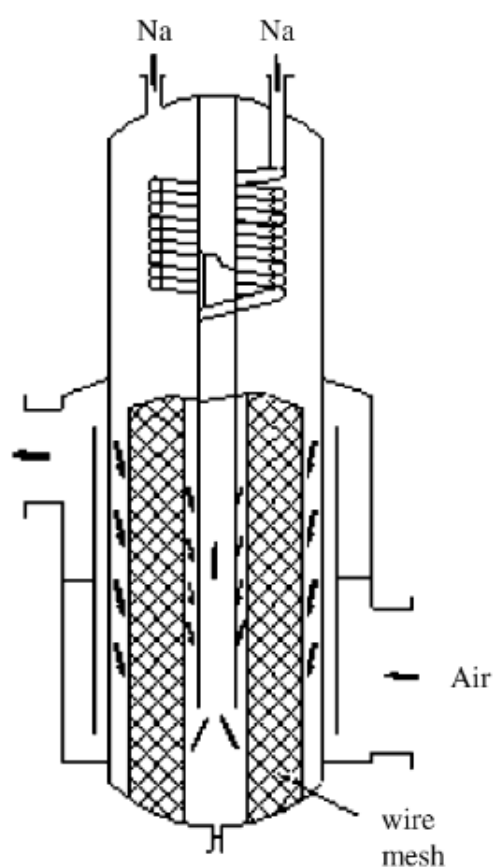
Při použití chladných jímek k čištění tekutého sodíku od kyslíku se v podmínkách ideálního promíchávání dá popsat změna koncentrace vztahem:

$$C = C' + \frac{G_{O_2} \cdot 100}{G_1} + (C_0^{-\frac{G_{O_2}}{G_1 \cdot \beta}} - C') \cdot e^{-\frac{G_1 \cdot \beta}{P_{Na}} \cdot \tau} \quad (5.4)$$

kde C je koncentrace kyslíku, C' je koncentrace kyslíku odpovídající nasycení při teplotě sodíku na výstupu z chladné jímky, G_{O_2} je intenzita zdroje kyslíku, G_1 je průtok sodíku chladnou jímkou, β je součinitel zachycení příměsí v chladné jímce, C_0 je počáteční koncentrace kyslíku, τ je čas a P_{Na} je hmotnost sodíku. Součinitel zachycení

kyslíku závisí jak na konstrukci chladné jímky, tak na jejích provozních režimech a na nahromadění příměsí v jímce. Součinitel roste v závislosti na snížení průtoku chladiva chladnou jímkou. [23]

Na obr. 15 můžeme vidět princip chladné jímky. Nejprve vstupuje sodík do horní části chladné jímky a proudí do spodní části, zatímco opačným směrem proudí chladicí médium. V tomto procesu se teplota tekutého sodíku sníží a nečistoty v něm obsažené se usadí na dně chladicí jímky. Poté sodík vstupuje středovou trubicí do menší spirálovité trubice a opouští chladnou jímku.



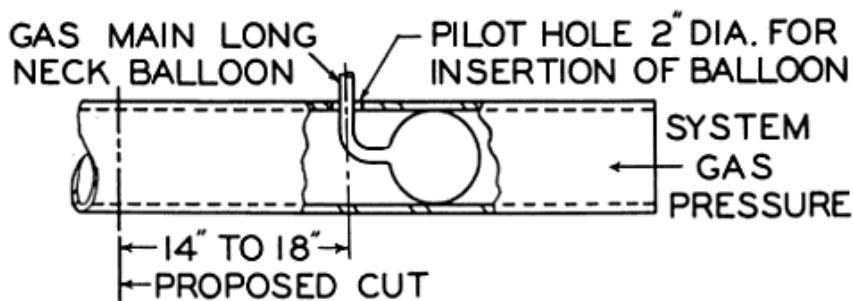
Obrázek 15: Zjednodušené schéma chladné jímky s nucenou cirkulací. [28]

5.4 Údržba tepelných systémů s tekutým sodíkem

Údržba a oprava sodíkových tepelných systémů zahrnuje určitá bezpečnostní opatření, která je třeba dodržovat. Tato opatření jsou nezbytná, aby se zabránilo nadměrné oxidaci sodíku, pokud je systém vystaven okolní atmosféře.

Existují tři obecně používané metody vhodné pro opravu sodíkových systémů. Pokud jsou opravy nebo údržba rozsáhlé, je žádoucí odstranit ze systému veškerý sodík. Po vypuštění potrubí je také chemicky odstraněn zbytkový sodík. Tento postup je sice pracný a složitý, jeho hlavní výhodou však je, že jakmile je sodík odstraněn, mohou být opravy systému prováděny běžným způsobem, tj. není zapotřebí žádný inertní plyn.

Dalšími způsoby jsou tzv. balónková metoda a metoda zmražení. Tyto dvě metody nejsou vhodné pro rozsáhlejší operace. V „balónkové metodě“ se nejdříve vypustí sodík, systém se nechá vychladnout na pokojovou teplotu a tlak inetrního plynu je snížen. Po zvolení umístění řezu je vyvrtán otvor o velikosti přibližně 50 mm. Do vyvrtaného otvoru se vloží prázdný balónek a nafoukne se. V balónku je vyšší tlak, než v potrubí a tím udržuje inetrtní plyn v systému a zabraňuje oxidaci. Tato metoda je vhodná zejména tam, kde je nadměrná oxidace nežádoucí. Pro menší potrubí, nebo v systémech kde je kontaminace kyslíkem méně kritická, může být systém vypuštěn a vyvrtán otvor bez použití balónku. [29]



Obrázek 16: Metoda použití balónkové techniky v sodíkovém systému. [29]

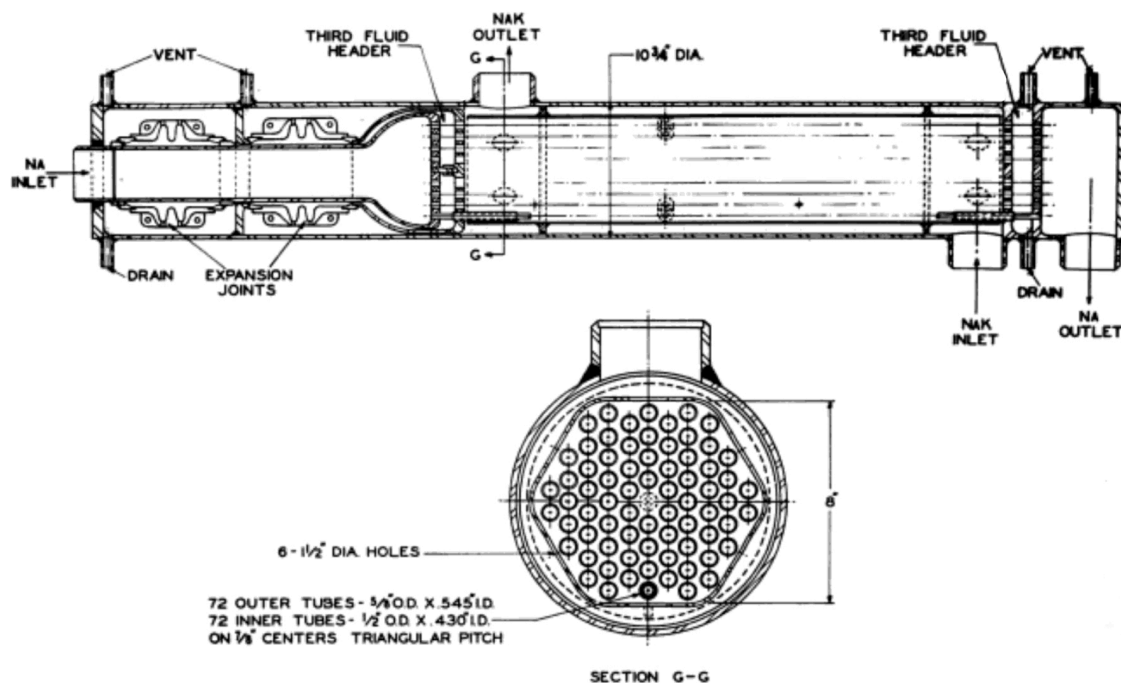
Při použití techniky zmražení sodík není vypouštěn ze systému. Těsnění je dosaženo tím, že necháme ztuhnout sodík v trubce, který slouží jako zátka. Po odříznutí trubky tak zůstává odkrytý pouze tuhý sodík, přestože povrch oxiduje, tato zátka chrání systém před kontaminací. V prvním kroku se odstraní tepelná izolace v místě řezu, to napomáhá urychlení doby zmražení. K tomuto účelu lze použít i umělé chlazení. U této metody je třeba dbát velké opatrnosti. Pokud je rychlost tepla dostatečná, sodíková zátka může roztát.

6 Zařízení v sodíkových tepelných systémech

Kromě chladných jímek a jiných čistících zařízení se v tepelných systémech nachází také další zařízení jako čerpadla mechanická a elektromagnetická, tepelné výměníky, parogenerátory a průtokoměry.

6.1 Tepelné výměníky

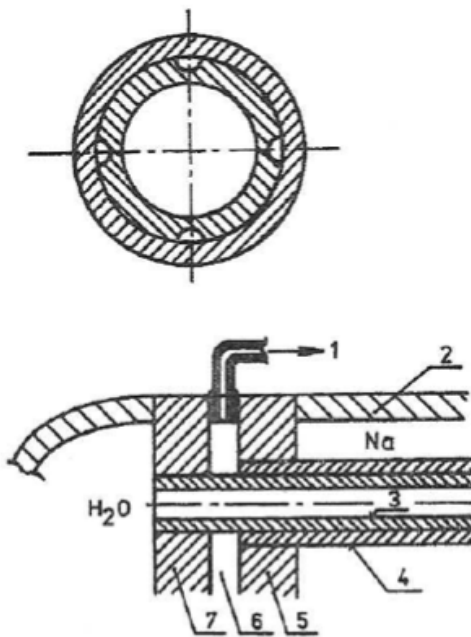
Tepelné výměníky jsou bezpochyby jedním z klíčových komponentů. Sodík jako chladicí médium má vysokou tepelnou vodivost, což umožňuje použití menších teplosměnných ploch. Na druhé straně jsou materiály tepelných výměníků značně namáhány. Tepelné výměníky se obvykle konstruují jako válcová jednotělová válcová konstrukce, kde sodík sekundárního okruhu proudí trubkami a sodík primárního okruhu tyto trubky zevně obtéká. Aby se snížilo tepelné namáhání, používají se přepážky usměrňující proudění sodíku z primárního okruhu. Aby se zabránilo smíchání sodíku z primárního a sekundárního okruhu při poškození trubky, používá se v sekundárním okruhu slitina sodíku s draslíkem NaK, která lépe pohlcuje neutrony.



Obrázek 17: Tepelný výměník Na-NaK. [30]

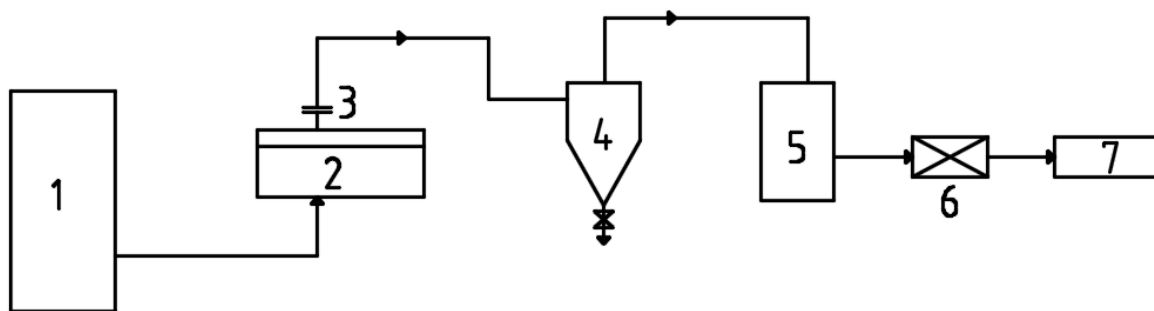
6.2 Parogenerátory

Parogenerátory sodík-voda jsou nekritičtějším místem v tepelném systému. Jak již bylo popsáno, sodík silně reaguje ve styku s vodou a probíhá silná exotermická reakce. Aby se zabránilo potenciální katastrofě jsou parogenerátory vybaveny pojistnými membránami, které zabráňují vzrůstu tlaku v důsledku reakce sodíku s vodou. Dalším bezpečnostním prvkem je konstrukce trubek s dvojitou stěnou, která je vyplněna inertním plynem, nebo médiem, které nereaguje ani s jednou provozní kapalinou.



Obrázek 18: Řez dvojitou trubkou. [31]

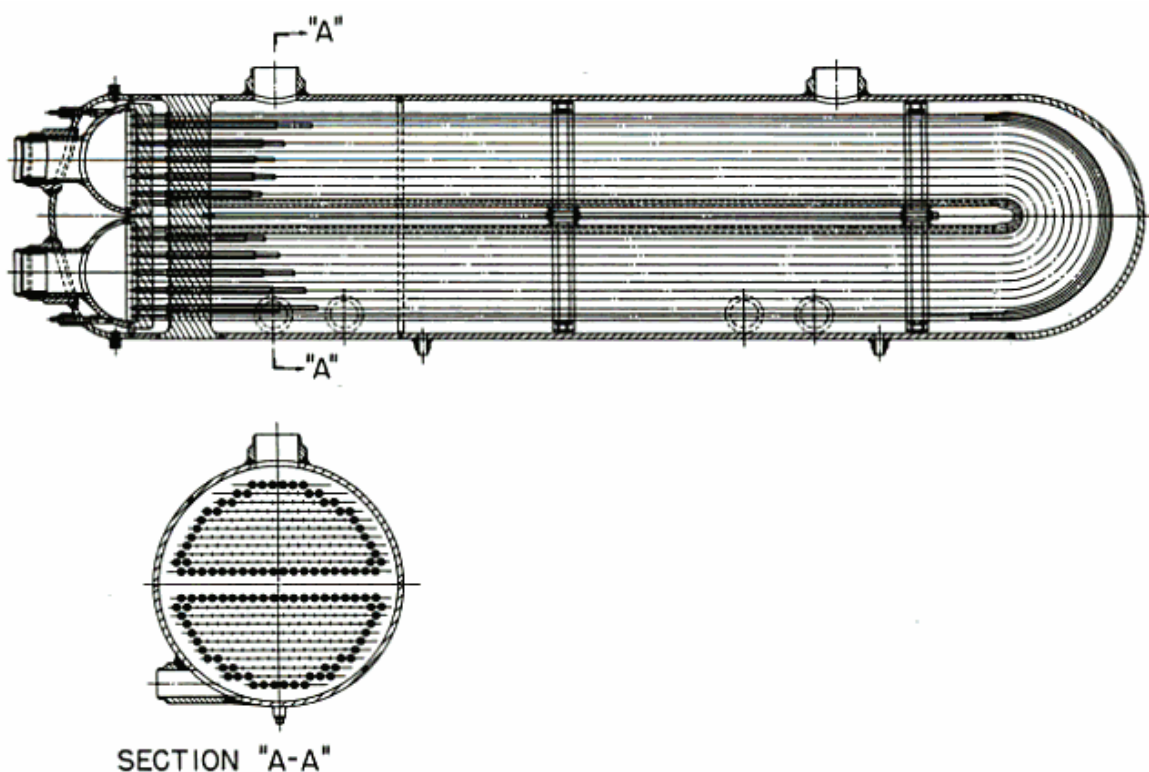
Legenda k obr. 18: 1 - indikace meziprostoru, 2 - plášť parogenerátoru, 3 - vnitřní trubka, 4 - vnější trubka, 5 - druhá trubkoviice, 6 - indikační meziprostor vyplnění inertním médiem, 7 - první trubkoviice



Obrázek 19: Havarijní systém parogenerátorů.

Legenda k obr. 19: 1 - parogenerátor, 2 - kompenzační nádrž, 3 - havarijní membrána, 4 - separátor, 5 - zásobník plynu, 6 - zařízení na spalování vodíku, 7 - nádrž

Uvnitř parogenerátoru je systém trubek ve kterých proudí jedna provozní kapalina a kolem trubek protéká druhá provozní kapalina. Pokud se jedná o přímou koncepci, v trubkách teče voda z terciálního okruhu a obtéká je sodík ze sekundárního okruhu. U inverzních parogenerátorů je to naopak. Výhodou inverzních parogenerátorů je ta, že v případě poruchy nemá sodík tolik prostoru na reakci s vodou a dochází tedy k utlumení následné reakce. Nevýhodou ovšem je, že parogenerátor musí být mnohem pevnější, jelikož voda z terciálního okruhu má vyšší provozní tlak než sodík ze sekundárního okruhu, tudíž bude tento typ parogenerátoru výrazně dražší.



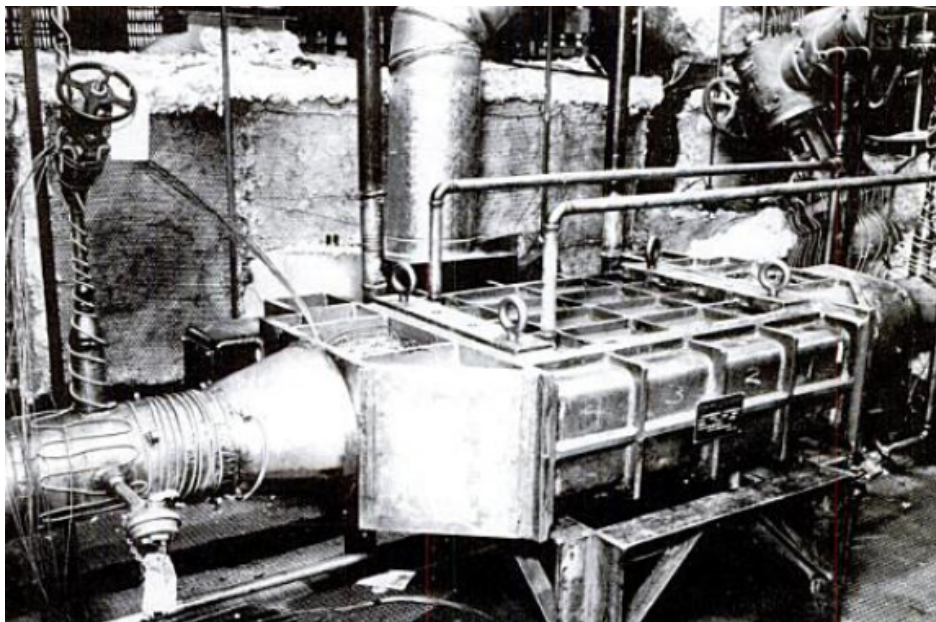
Obrázek 20: Schéma parního generátoru, U-trubková konstrukce. [30]

6.3 Oběhová čerpadla

K čerpání sodíku se používají dva typy čerpadel - elektromagnetická a mechanická, z nichž každá mají své výhody a nevýhody.

6.3.1 Elektromagnetická čerpadla

Elektromagnetická čerpadla se vyznačují nízkou účinností, ale ve větších rozměrech jsou konkurenceschopné s mechanickými čerpadly. Na druhou stranu nepotřebují těsnění, jejich údržba je jednodušší a nejsou tak náchylná na poruchy jako mechanická čerpadla, jelikož nemají pohyblivé prvky. Jsou také odolnější vůči radioaktivitě, vyšší teplotě a nepotřebují mazání, odpadá tedy problém se znečištěním sodíku mazacími oleji. Sodík působí jako vodič pohybující se ve vzájemně kolmých polích magnetickém a elektrickém. Používají se dva druhy čerpadel, indukční a kondukční, které využívají stejnosměrný (DC) i střídavý proud (AC). Výhodou použití střídavého proudu je, že se čerpadlo napájí pomocí transformátoru, který je připojen přímo na síť, konstrukce čerpadel se střídavým proudem je také jednodušší než je tomu u čerpadel se stejnosměrným proudem. Čerpadla se střídavým proudem mají ovšem nižší účinnost, jelikož vykazují velké ztráty, mají také složitější konstrukci a tedy vyšší pořizovací náklady.

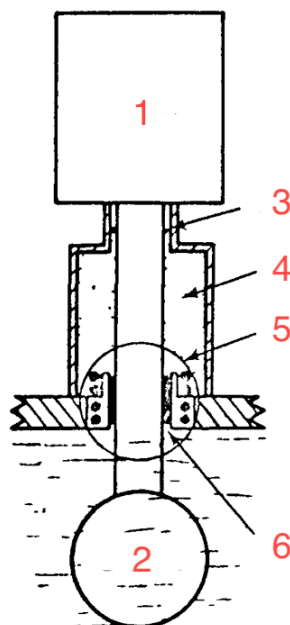


Obrázek 21: Lineární indukční čerpadlo. [30]

6.3.2 Mechanická čerpadla

Mechanická čerpadla mají oproti elektromagnetickým čerpadlům vyšší účinnost. U těchto čerpadel je však třeba řešit problematiku mazání a těsnění. Jako těsnění se používá inertní plyn, který izoluje motorovou část čerpadla od tekutého sodíku. Jako

těsnění se ovšem může použít i samotný sodík. Podobně jako u metody zmražení při údržbě, se ochlazením prstence stává z tekutého sodíku sodík tuhý, a tvoří tedy jakousi bariéru. U této metody je ovšem nutnost intenzivního chlazení prstence.

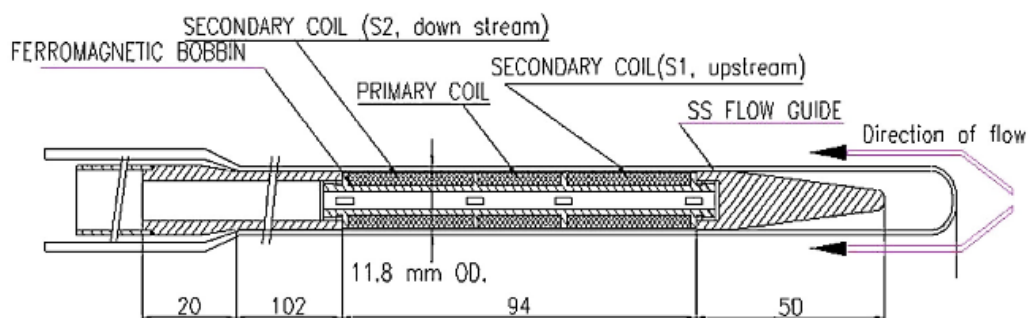


Obrázek 22: Mechanická pumpa s ucpávkou z tuhého sodíku. [32]

Legenda k obr. 23: 1 - motor, 2 - čerpadlo, 3 - plynové těsnění, 4 - inetrní plyn, 5 - ucpávka z tuhého sodíku, 6 - prstenec zmrzlého sodíku

6.4 Průtokoměry

Pro měření průtoku potrubím se používají elektromagnetické průtokoměry, které pracují na podobném principu jako elektromagnetická čerpadla.



Obrázek 23: Řez průtokoměru k měření vířivých proudů. [33]

7 Sdílení tepla v tekutých kovech

7.1 Teorie sdílení tepla

Sdílením tepla se nazývá přenos energie z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s teplotou nižší. To je dáno platností druhého termodynamického zákona. Který nám říká: „Tepla nemůže samovolně přecházet z tělesa o teplotě nižší, na těleso o teplotě vyšší.“ Přenos tepla může probíhat kondukcí (vedením), konvekcí (prouděním) nebo radiací (zářením).

7.1.1 Sdílení tepla kondukcí

Vedení tepla se uskutečňuje především v tuhých látkách, v tekutinách se uskutečňuje pouze za jistých podmínek. Částice, které mají v oblasti s vyšší teplotou vyšší kinetickou energii, předávají tuto energii prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší kinetickou energií. Částice se při tomto přenosu tepla nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh.

Základním zákonem vedení tepla je *Fourierův zákon*, který říká, že hustota tepelného toku je úměrná zápornému gradientu teploty. Znaménko mínus je v rovnici z důvodu, že teplo přechází z oblasti o teplotě vyšší, do oblasti o teplotě nižší.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (7.1)$$

7.1.2 Sdílení tepla konvekcí

Přenos tepla konvekcí neboli prouděním můžeme uplatit pouze u tekutin (kapalin a plynů, včetně plazmy). Pokud má tekutina různé teploty, tedy i hustoty (s rostoucí teplotou klesá hustota), dochází k pohybu hmoty. Tento pohyb způsobuje, že částice uvnitř kapalin nebo plynů se pohybují relativně vůči sobě a zvyšují přenos tepla z oblastí o vyšší teplotě do chladnějších oblastí. Tekutina je ovšem složena z elementárních částic, ve kterých dochází ke sdílení tepla kondukcí. Při proudění tekutin kolem pevných těles se vytvoří tenká mezní vrstva, ve které probíhá přenos tepla prakticky pouze kondukcí. Konvekce tepla je tedy doprovázena kondukcí, můžeme říci, že se jedná o konvekčně - kondukční přenos tepla.

Proudění můžeme rozdělit na přirozené a nucené. Jak již bylo popsáno výše, ke sdílení tepla přirozenou konvekcí dochází změnou hustoty tekutiny, která je vyvolána různou teplotou. O nucené konvekci hovoříme tehdy, pokud je pohyb vyvolán vnější silou, u kapalin to může být zapříčiněno např. čerpadlem, samospádem a u plynů ventilátorem nebo tahem komína. Základním zákonem sdílení tepla konvekcí je *Newtonův ochlazovací zákon* (7.2), který popisuje jaké množství tepla se vymění mezi proudící tekutinou a pevnou stěnou (fázovým rozhraním), tj. přestup tepla. Kde α je součinitel přestupu tepla, t_s je teplota stěny a t teplota tekutiny:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta t = \alpha \cdot (t - t_s) \quad (7.2)$$

7.1.3 Sdílení tepla radiací

Sdílení tepla radiací neboli zářením se svou povahou liší od kondukce a konvekce. Vzhledem k tomu, že radiace je elektromagnetické záření, které ke svému přenosu nepotřebuje hmotu, může se tepelná energie přenášet i v prázdném prostoru (ve vakuu). Dopadne-li záření na nějaké jiné těleso a dojde-li k pohlcení tohoto záření, zvýší se vnitřní energie daného tělesa. Pro sdílení tepla kondukcí a konvekcí závisí tepelný tok na rozdílu teplot, u sdílení tepla radiací to však neplatí. Tepelný tok u sdílení tepla radiací závisí přímo na teplotě tělesa. Intenzita záření absolutně černého tělesa je popsána *Stefan-Boltzmannovým zákonem* (7.3), pokud ovšem těleso není absolutně černé, musíme přidat další parametr ε , který značí emisivitu, neboli schopnost tělesa vyzařovat teplo:

$$I = \sigma \cdot T^4 \quad (7.3)$$

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (7.4)$$

kde I značí intenzitu záření, σ značí Stefan-Boltzmannovu konstantu, která má hodnotu $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ a T absolutní teplotu.

7.2 Kritéria podobnosti

Alkalické tekuté kovy a jejich slitiny se výrazně liší svými vlastnostmi přenosu tepla od normálních tekutin. U tekutých kovů je tedy nutné použít rovnice založené na experimentálních datech, neboli tzv. kritériální rovnice. V praxi se používá několik kritérií podobnosti. Tato kritéria jsou bezrozměrné veličiny.

7.2.1 Pécletovo kritérium

Pécletovo kritérium udává podíl významu proudění entalpie (tepelného obsahu) a vedení tepla. Kde L je charakteristická délka (významný rozměr systému), v je rychlost proudění, a značí teplotní součinitel.

$$\text{Pe} = \frac{L \cdot v}{a} \quad (7.5)$$

7.2.2 Reynoldsovo kritérium

Reynoldsovo kritérium vyjadřuje poměr hybnosti a třecích sil. Dle Reynoldsova čísla můžeme určit zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění. Při nízkých hodnotách Reynoldsova čísla tření poměrně rychle utlumí vznikající účinek proudu a zachová laminární proudění. Při velkých hodnotách Reynoldsova čísla dojde ke ztátě stability proudění a vznikají turbulence.

$$\text{Re} = \frac{L \cdot v}{\nu} \quad (7.6)$$

7.2.3 Nusseltovo kritérium

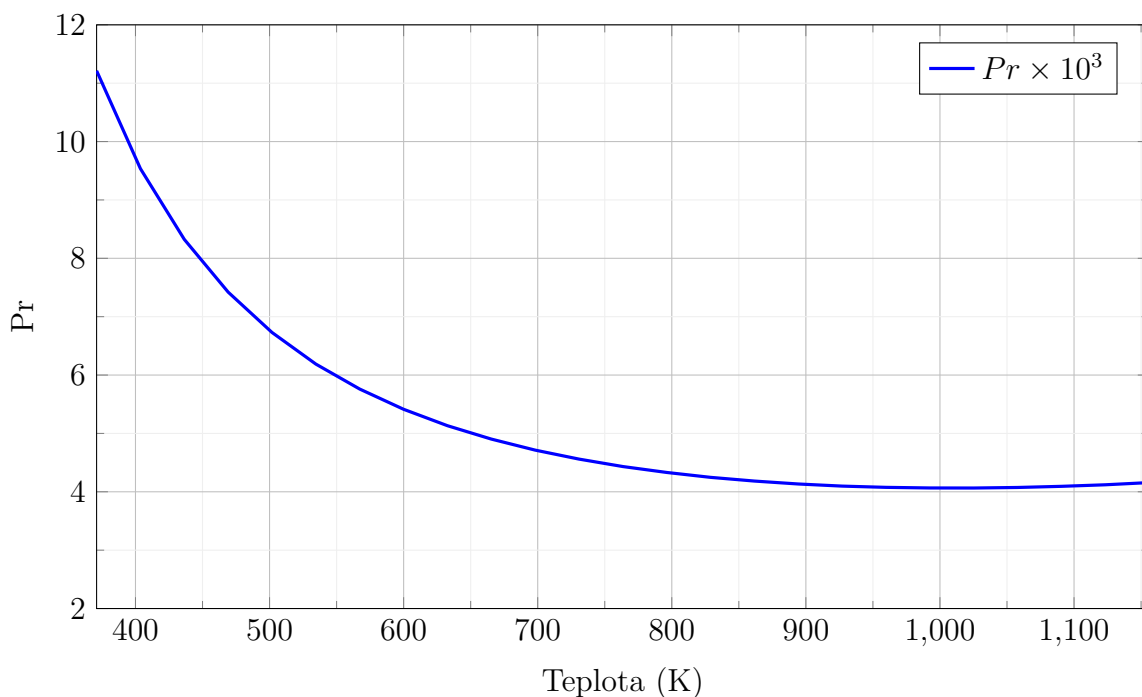
Nusseltovo kritérium představuje podíl tepelného toku přestupem ku tepelnému toku v hypotetickém nehybném prostředí, ve kterém by docházelo ke sdílení tepla pouze kondukcí. Jinými slovy je to podíl významu přestupu a vedení tepla. Je-li hodnota $\text{Nu}=20$, přestup tepla konvekcí je dvacetkrát intenzivnější, než přestup tepla kondukcí. Čím větší je tedy Nusseltovo číslo, tím účinnější bude sdílení tepla prouděním.

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (7.7)$$

7.2.4 Prandtlovo kritérium

Z fyzikálního hlediska jsou chladiva charakterizována Prandtlovým číslem, které vyjadřuje poměr mezi sdílením hybnosti a tepla, respektive podíl Pécletova čísla a Reynoldsova čísla, můžeme si všimnout, že Pécletovo a Reynoldsovo číslo se liší pouze viskozitou ν , potažmo teplotní vodivostí a . Potřebujeme tedy chladicí médium, které má Prandtlovo číslo co nejmenší. Pro tekuté kovy jako je sodík nebo slitina sodíku a draslíku NaK je Prandtlovo číslo velmi malé. Na grafu níže můžeme vidět Prandtlovo číslo pro tekutý sodík v závislosti na teplotě.

$$\text{Pr} = \frac{\text{Pe}}{\text{Re}} = \frac{\nu}{a} \quad (7.8)$$



7.2.5 Grashoffovo kritérium

Grashoffovo kritérium představuje poměr vztlakových a viskózních sil, charakterizující volné proudění, které vznikne rozdílem teplot.

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t \quad (7.9)$$

7.3 Přirozená konvekce

V jaderných a termojaderných elektrárnách chlazených tekutým sodíkem dochází k přirozené konvekci nejen u chlazení některých komponent, ale také u „nucených“ toků s nízkou rychlostí, rozmrazování a zmrazování určitých oblastí. Matematicky může být přirozená konvekce charakterizována dodatečnými pohybovými rovnicemi. Můžeme ji vyjádřit jako: [30]

$$(\rho - \rho_S) \cdot f_i = -\rho \cdot f_i \cdot \beta \cdot (t - t_S) \quad (7.10)$$

kde f_i je složka zrychlení ve směru i , ρ je hustota, t je absolutní teplota a β je teplotní součinitel objemové roztažnosti kapaliny. Spodní index S značí referenční podmínky hydrostatického stavu.

Grashofovo číslo vypočteme:

$$\text{Gr}_l = f_i \cdot \frac{\beta \cdot (t - t_S) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (7.11)$$

Parametr K odvozený Ostrachem musíme zahrnout pokud se zvýší ohřev třením:

$$K = \text{Gr}_l \cdot \frac{\text{Pr} \cdot \beta \cdot f_i \cdot L}{c_p} \quad (7.12)$$

Pro tekutý sodík je Prandtlovo číslo velmi malé. Přirozená konvekce o toku velkého objemu souvisí s jednotným seskupením $\text{Gr} \cdot \text{Pr}^2$, které je nezávislé na kinematické viskozitě. Ovšem v uzavřených oblastech hraje viskozita větší roli než zrychlení tekutiny, pak tedy Grashofovo a Prandtlovo číslo musíme vyjádřit samostatně. [30]

7.4 Nucená konvekce

Nucená konvekce je děj, při kterém se teplo přenáší mezi pevnou látkou a tekutinou, která proudí podél povrchu pevné látky. Toto proudění je vyvoláno vnější silou. Obecně můžeme zapsat korelaci pro nucenou konvekci jako:

$$\text{Nu} = x_1 + x_2 \cdot \text{Pe}^{x_3} \quad (7.13)$$

Hodnoty pro konstanty x_i se hledají např. pomocí metody nejmenších čtverců nebo lichoběžníkové metody. Výsledky se porovnávají s experimentálními daty. [34]

7.4.1 Predikce přestupu tepla v kruhovém potrubí

Kruhový průřez je nejčastější geometrií vyskytující se v technických zařízeních pro přenos tepla zahrnující turbulentní proudění a nucenou konvekci. U tekutých kovů nelze aplikovat běžné vztahy pro ostatní druhy tekutin. První teoretickou studii přestupu tepla v kruhovém potrubí pro rovnoměrný tepelný tok provedl Martinelli. [35]

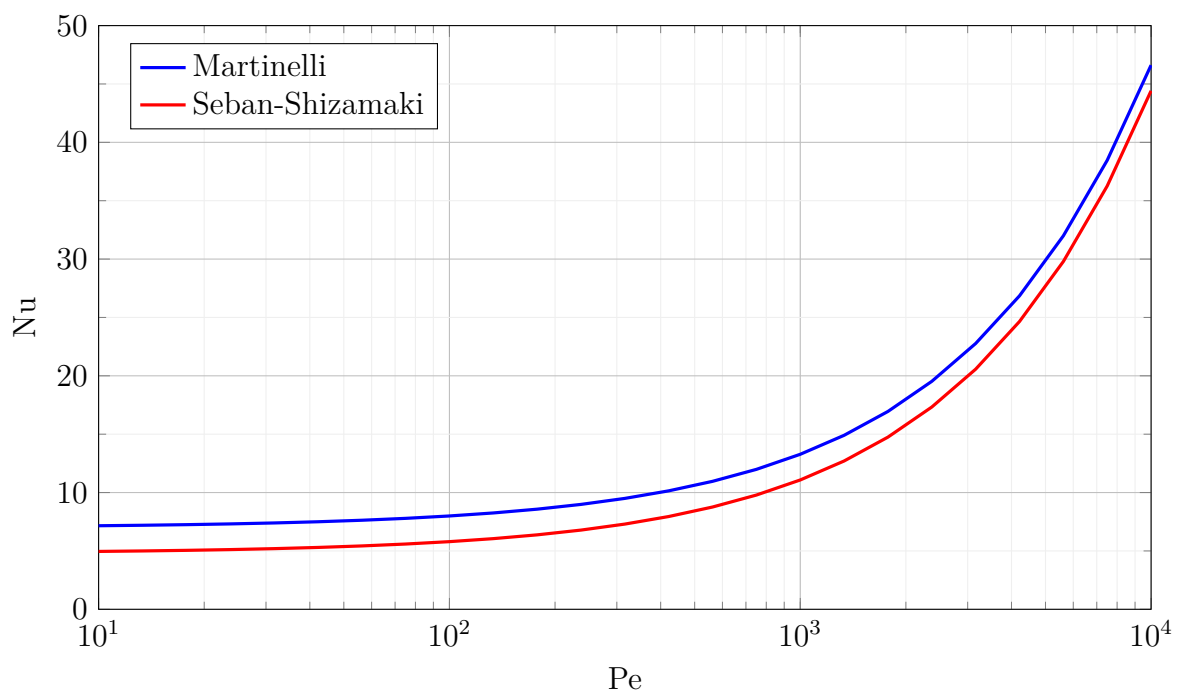
$$\text{Nu} = 7 + 0.025\text{Pe}^{0.8} \quad (7.14)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot \left[7 + 0.025 \cdot \left(\frac{L \cdot v}{a} \right)^{0.8} \right] \quad (7.15)$$

Pro uvažování rovnoměrné teploty stěny použijeme Seban-Shizamakiho vztah (7.16). Graf níže ukazuje závislost Nusseltova čísla na Pécletově čísle. [35]

$$\text{Nu} = 4.8 + 0.025\text{Pe}^{0.8} \quad (7.16)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot \left[4.8 + 0.025 \cdot \left(\frac{L \cdot v}{a} \right)^{0.8} \right] \quad (7.17)$$



7.4.2 Predikce přestupu tepla v mezikruhovém kanálu

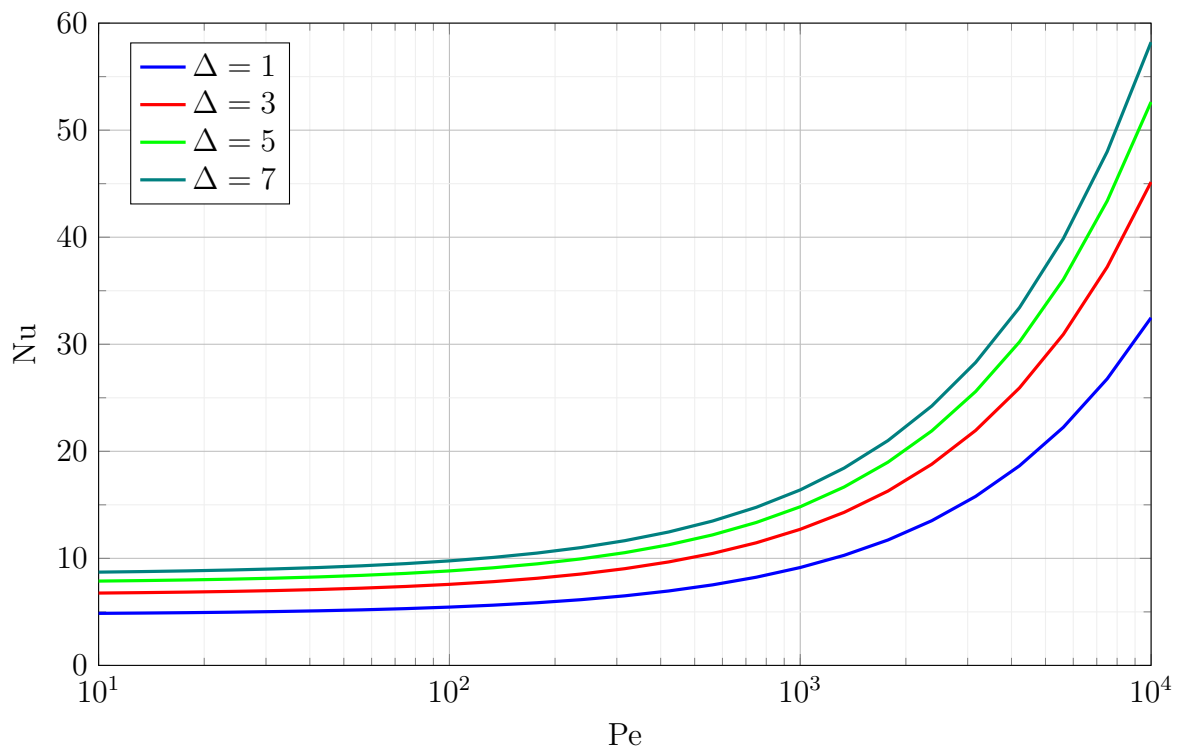
Teoretické řešení vychází z podobných vztahů jako v případě kruhové trubky. Definujme si mezikruží vnějším průměrem D a vnitřním průměrem d , podílem těchto dvou hodnot získáme poměr Δ , který bude nabývat hodnot jedna až sedm, Nusseltovo číslo budeme zjišťovat v rozmezí $Pe = 10 \div 10000$. [36]

$$Nu = \Delta^{0.3} \cdot (x_1 + x_2 \cdot Pe^{x_3}) \quad (7.18)$$

- $x_1 = 4.75$
- $x_2 = 0.0175$
- $x_3 = 0.8$
- $\Delta = \frac{D}{d} = 1 \div 7$

$$Nu = \Delta^{0.3} \cdot (4.75 + 0.0175 \cdot Pe^{0.8}) \quad (7.19)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot \left\{ \Delta^{0.3} \cdot \left[4.75 + 0.0175 \cdot \left(\frac{L \cdot v}{a} \right)^{0.8} \right] \right\} \quad (7.20)$$

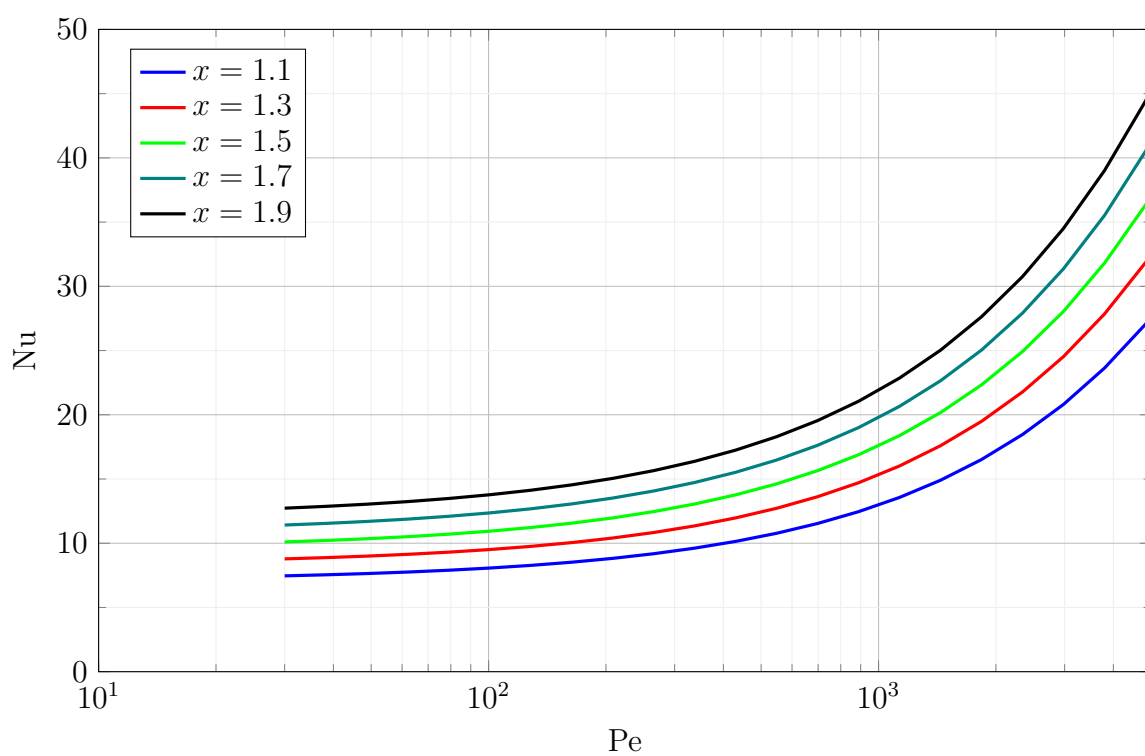


7.4.3 Podélné obtékání svazků trubek v trojúhelníkové mříži

Uspořádání svazků trubek v trojúhelníkové mříži je velmi časté u tepelných výměníků Na - Na a parogenerátorů Na - H₂O. Abychom převedli řešení geometricky složitěho kanálu na jednodušší tvar, budeme postupovat jako při řešení mezikruhového kanálu a stanovíme si poměr, tentokrát x , které bude v rozsahu $x = 1.1 \div 1.9$. Použijeme korelaci podle Gräbera, která vykazuje velkou přesnost v rozsahu $Pe = 30 \div 5000$: [37]

$$Nu = 0.25 + 6.2x + (0.032x - 0.007) \cdot Pe^{0.8-0.024x} \quad (7.21)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot \left[0.25 + 6.2x + (0.032x - 0.007) \cdot \left(\frac{L \cdot v}{a} \right)^{0.8-0.024x} \right] \quad (7.22)$$



Závěr

Cílem této práce bylo podat ucelené shrnutí energetických fúzních reaktorů, zvláště pak kompaktních reaktorů se zaměřením na tekutý sodík jako chladícího média. Popsat termonukleární reakci s využitím lithia, které je nutné na „množení“ tritia, tritium je však velmi vzácné a na Zemi se prakticky nevyskytuje.

V práci jsou popsány fúzní reakce deuteria a tritia s využitím lithia, deuteria, ale také tzv. bezneutronová fúze, kde dochází ke slučování vodíku a boru. Jelikož tato reakce neprodukuje žádné neutrony, nedochází k sekundární radioaktivitě a není tedy potřeba radioaktivní štít. Použití této reakce je tedy ideální pro pohonný systém vesmírných plavidel. Tímto se dostáváme k další kapitole, kde je popsána koncepce kompaktních fúzních reaktorů. Díky jejich skromné velikosti by mohly sloužit jako pohonné jednotky lodí, letadel a vesmírných plavidel. Jejich menší výkon kompenzují mnohem menší náklady na stavbu těchto zařízení. Kompaktní fúzní reaktory by také mohly srazit cenu technologie odsolování až o polovinu a zpřístupnit tak pitnou vodu milionům lidí v oblastech, které jsou suchem postihnuté nejvíce.

Další část práce popisuje fyzikální a chemické vlastnosti tekutého sodíku, který silně reaguje s vodou a kyslíkem, proto hrozí určité nebezpečí při úniku tekutého sodíku z tepelného systému, zejména pak v parogenerátoru, kde se nachází sodík i voda a je tedy nejkritičtější částí systému. Tekutý sodík má vysokou teplotu varu, díky tomu může tepelný systém pracovat s menšími tlaky, než je tomu u systému s použitím vody jako chladícího média, která má bod varu ve stejných teplotách, jako sodík bod tání. Tekutý sodík má také skvělé teplotnosné vlastnosti, to ovšem platí o čistém sodíku. Příměsi v něm obsažené značně zhoršují teplotnosné a fyzikální vlastnosti sodíku. Z tohoto důvodu musíme do systému zařadit čistící zařízení, kde se nejvíce osvědčila chladná jímka.

Důležitou kapitolou této práce je sdílení tepla v tekutých kovech. K pochopení této problematiky je nutné si nejdříve vysvětlit jak funguje přestup tepla a co to jsou podobnostní kritéria. Alkalické kovy se výrazně liší svými vlastnostmi od normálních tekutin, a je tedy nutné použít rovnice s využitím kritériálních čísel. Tyto rovnice se

porovnávají s naměřenými experimentálními daty. Sestavené rovnice odpovídají vždy určitému typu sdílení tepla za jasně daných podmínek. Ačkoliv tyto rovnice sestavovalo velké množství autorů, kde bylo použito několik metod, výsledky prokázaly, že hodnoty Nusseltova čísla se příliš neliší od naměřených hodnot.

Seznam použité literatury

- [1] Entler, S.; Ficker, O.; Havlíček, J.; aj.: *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*. ÚFP AV ČR, Prague, 2019.
- [2] Wikipedia: Nuclear fusion — Wikipedia, The Free Encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuclear%20fusion&oldid=941608618>, 2020, [cit. 22-02-2020].
- [3] Coulomb's law - ENERGY EDUCATION. *University Calgary* [online]. [cit. 22-02-2020].
Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coulomb%27s_law
- [4] Coulomb Barrier for Fusion. *Georgia State University* [online]. [cit. 22-02-2020].
Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/coubar.htmlc2>
- [5] Základy fúzní energetiky V. *TZB-info* [online]. [cit. 22-02-2020].
Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14704-zaklady-fuzni-energetiky-v-vyroba-elektriny>
- [6] Lawson, J.: Some criteria for a useful thermonuclear reactor. *Atomic Energy Research Establishment*, 1955.
- [7] Kikuchi, M.; Lackner, K.; Tran, M. Q.: *Fusion physics*. International Atomic Energy Agency Vienna, 2012, ISBN 978-92-0-130410-0.
- [8] Entler, S.: Jaderná fúze–budoucnost energetiky. *Energetika*, ročník 3, 2015: str. 136.
- [9] Wendelstein 7-X. *Max Planck Institute for Plasma Physics* [online]. [cit. 01-05-2020].
Dostupné z: <https://www.ipp.mpg.de/2815232/konzeptentwicklung>
- [10] Elektřina z fúze (II) - fyzikální základy. *TZB-info* [online]. [cit. 01-05-2020].
Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/10045-elektrina-z-fuze-ii-fyzikalni-zaklady>

- [11] McCracken, G.; Stott, P.: *Fusion: the Energy of the Universe*. Academic Press, 2013.
- [12] McGuire, T.: Compact Fusion Reactor - CFR. Overview, Status And Development Plan. 2017.
- [13] Gryaznevich, M.; Asunta, O.; Team, T. E. L.: Overview and status of construction of ST40. *Fusion Engineering and Design*, ročník 123, 2017: s. 177–180.
- [14] Cheung, A.; Binderbauer, M.; Liu, F.; aj.: Colliding beam fusion reactor space propulsion system. In *AIP Conference Proceedings*, ročník 699, American Institute of Physics, 2004, s. 354–361.
- [15] Kulhánek, P.: *Úvod do teorie plazmatu*. AGA, 2011.
- [16] Koc, S.: Pokroky matematiky, fyziky a astronomie. Plazma v pevných látkách. 1967.
- [17] Chen, F. F.; aj.: *Introduction to plasma physics and controlled fusion*, ročník 1. Springer, 1984.
- [18] Foust, O.: Sodium-NaK Engineering handbook. Vol. I. Sodium chemistry and physical properties. 1972.
- [19] Sobolev, V.: Database of thermophysical properties of liquid metal coolants for GEN-IV. 2011.
- [20] United States Office of Naval Research, C.: *Liquid-metals handbook*. US Government Printing Office, 1952.
- [21] Electrolysis of Molten Salts and Electrolysis of Brine. *Chemistry LibreTexts* [online]. [cit. 29-04-2020].
Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/IntroductoryChemistry/Book%3AIntroductoryChemistry\(CK-12\)/](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/IntroductoryChemistry/Book%3AIntroductoryChemistry(CK-12)/)
- [22] Razuvanov, N.; Frick, P.; Belyaev, I.; aj.: Experimental study of liquid metal heat transfer in a vertical duct affected by coplanar magnetic field: Downward flow. 2019, ISSN 0017-9310.

- [23] Šulc, V.: Pokroky v sodíkové technologii, měření a diagnostice rychlých reaktorů. *Ústřední informační středisko pro jaderný program*, 1984.
- [24] Subbotin, V.; Arnol'Dov, M.; Kozlov, F.; aj.: Liquid-metal coolants for nuclear power. *Atomic energy*, ročník 92, č. 1, 2002: s. 29–40.
- [25] Morcinek, P.; Prnka, T.; Walder, V.; aj.: Zařízení a metodika zkoušení vlastností ocelí v tekutém sodíku. 1980.
- [26] Ainsley, R.; Hartlib, L. P.; Holroyd, P.; aj.: The solubility of carbon in sodium. *Journal of Nuclear Materials*, ročník 52, č. 2, 1974: s. 255–276.
- [27] IAEA: *Liquid Metal Coolants for Fast Reactors (Reactors Cooled by Sodium, Lead and Lead-bismuth Eutectic)*. International Atomic Energy Agency, 2012.
- [28] Zhao, F.; Ren, X.: Optimal performance analysis of a sodium cold trap. *Nuclear Engineering and Design*, ročník 239, č. 3, 2009: s. 490–494.
- [29] Foust, O.: Sodium-NaK engineering handbook. Volume III. Sodium systems, safety, handling, and instrumentation. 1978.
- [30] Jackson, C. B.: *Liquid-metals Handbook: Sodium-NaK Supplement*. US Government Printing Office, 1955.
- [31] Hezlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren 2. díl*. ČVUT FJFI, 2005.
- [32] Nixon, D.: SURVEY OF SODIUM PUMP TECHNOLOGY. Technická zpráva, Westinghouse Electric Corp. Atomic Power Div., Pittsburgh, 1963.
- [33] Sureshkumar, S.; Sabih, M.; Narmadha, S.; aj.: Utilization of eddy current flow meter for sodium flow measurement in FBRs. *Nuclear engineering and Design*, ročník 265, 2013: s. 1223–1231.
- [34] Taler, D.: Heat transfer in turbulent tube flow of liquid metals. *Procedia Engineering*, ročník 157, 2016: s. 148–157.
- [35] Lyon, R. N.; Poppendiek, H.: Liquid-Metal Heat Transfer. *Liquid-metals Handbook*, 1951: str. 184.

- [36] Jaeger, W.; Hering, W.; Lux, M.: On the liquid metal heat transfer in annular channels: Review, proposal and validation of empirical models. *Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, ročník 16, 2015: s. 2073–2086.
- [37] Mikityuk, K.: Heat transfer to liquid metal: review of data and correlations for tube bundles. *Nuclear Engineering and Design*, ročník 239, č. 4, 2009: s. 680–687.

Seznam obrázků

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Vazebná energie jader [2] | 15 |
| 2 | Coulombův zákon [3] | 16 |
| 3 | Coulombova potenciálová bariéra [4] | 17 |
| 4 | Účinný průřez fúzních reakcí [5] | 18 |
| 5 | Základní schéma koncepce tokamaku. [8] | 20 |
| 6 | Magnetické cívky a plazma stelarátoru Wendelstein 7-X. [9] | 20 |
| 7 | (a) ohřev, (b) komprese, (c) zapálení, (d) fúze. [11] | 21 |
| 8 | Komora reaktoru Lockheed Martin CFR T5. [12] | 24 |
| 9 | Reaktor Lockheed Martin CFR T5. [12] | 25 |
| 10 | Reaktor ST40 s popisem hlavních komponent. [13] | 26 |
| 11 | Vesmírný pohonný systém s paprskovým fúzním reaktorem CBFR-SPS. [14] | 27 |
| 12 | Debyeovo stínění [17] | 32 |
| 13 | Downův článek používaný na elektrolýzu taveného chloridu sodného. [21] | 37 |
| 14 | Příklad chladné jímky s volnou cirkulací [18] | 44 |
| 15 | Zjednodušené schéma chladné jímky s nucenou cirkulací. [28] | 45 |
| 16 | Metoda použití balónkové techniky v sodíkovém systému. [29] | 46 |
| 17 | Tepelný výměník Na-NaK. [30] | 47 |
| 18 | Řez dvojitou trubicí. [31] | 48 |
| 19 | Havarijní systém parogenerátorů. | 48 |
| 20 | Schéma parního generátoru, U-trubková konstrukce. [30] | 49 |
| 21 | Lineární indukční čerpadlo. [30] | 50 |
| 22 | Mechanická pumpa s ucpávkou z tuhého sodíku. [32] | 51 |
| 23 | Řez průtokoměru k měření vířivých proudů. [33] | 51 |

Seznam tabulek

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Parametry fúzního reaktoru pro 100 MW CBFR. [14] | 29 |
| 2 | Parametry pohonu pro 100 MW CBFR-SPS. [14] | 30 |
| 3 | Hmotnost jednotlivých komponent pro 100 MW H-B CBFR-SPS. [14] . | 30 |
| 4 | Charakteristika tekutých kovů - chladiwa pro jaderná zařízení. [24] . . . | 39 |

Seznam příloh

Příloha č. 1: Základní schéma termonukleární elektrárny o výkonu 100 MWe.

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu při studiu.